

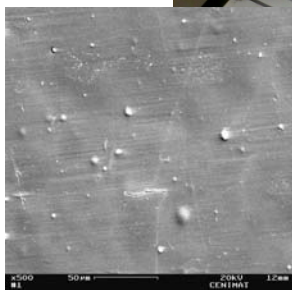
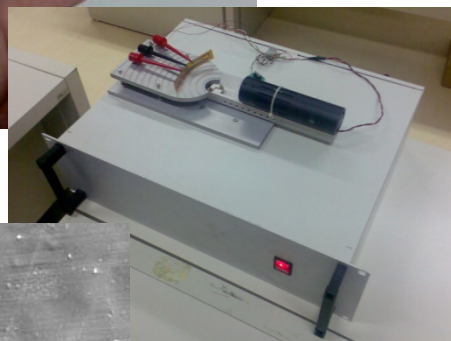
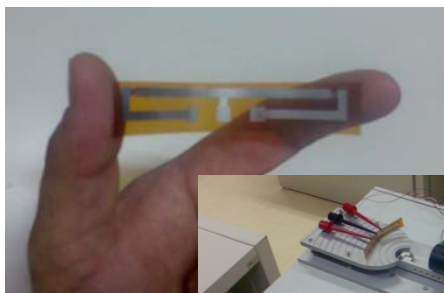
**UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DOS MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA OPTOELECTRÓNICA  
PARA CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES DE POSIÇÃO FLEXÍVEIS**

**DAVID MIGUEL VENTURA DE CASTRO ALVES**



Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia dos Materiais, pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Orientador: **PROFESSORA DOUTORA ELVIRA M.C. FORTUNATO**

Monte de Caparica  
Fevereiro de 2008



## **Agradecimentos**

Muitas pessoas contribuíram para este trabalho e de muitas formas e maneiras. Umas somente por apoiarem enquanto outras através de ideias e comentários. A todas, desde já, um muitíssimo obrigado.

Gostava de agradecer ao meu Deus, Jeová, por todo o apoio e força em mais uma etapa da minha vida. Obrigado por toda a orientação e disciplina, amor e compreensão.

Um carinho também muito especial a toda a minha família. Um beijo muito especial às minhas filhas que elas assistiram ao começo e final desta etapa. A mais velha pelo começo e a mais nova, pelo final. Também não podia esquecer a minha mulher, Ana, pela força de continuar. Um abraço do fundo do meu coração também aos meus melhores amigos, o meu irmão, Pedro Gabriel e ao meu primo, Daniel Cunha. Não podia deixar de agradecer aos meus queridos Pais, por toda a ajuda, carinho, apoio e compreensão que me dedicaram todos estes anos. E um beijo à minha querida irmã, Célia. A todos vós, um grande obrigado.

Tal como família, embora não de sangue, também tenho que agradecer a todos aqueles amigos que me rodeiam. Pois sem vocês, teria sido muito mais difícil. Um muito obrigado desde já aos meus amigos e colegas: Manuel Abreu, António Oliveira e João Pinto Coelho pelo vosso companheirismo, amizade e conhecimentos, nestes anos que passámos juntos no trabalho e não só. É claro que não me podia esquecer do restante dos amigos e colegas do INETI, Pedro Santos, Fernando Monteiro, Catarina Silva, Carla Domingues e a todos os outros, obrigado.

Neste período no qual decorreu o mestrado, conheci pessoas muito especiais e prestativas na Faculdade. Pessoas essas que com o passar do tempo passaram de conhecidos para amigos.

Estou-me a referir à Alexandra Gonçalves, Sónia Pereira e ao Daniel Costa. É claro outros tais como o Pedro Barquinha, Gonçalo Gonçalves, António Marques, Luís Tomás e Ana Alentejano, também contribuíram de forma significativa. Um obrigado à Prof.<sup>a</sup> Elvira Fortunato e ao Prof. Rodrigo pela orientação e conselhos; e um obrigado à restante da equipa do CENIMAT e CEMOP. Também gostaria de agradecer ao João Canejo pelas imagens de SEM, à Prof.<sup>a</sup> Virgínia Chu do INESC pela colaboração nas poliamidas e ao Prof. Pedro Alpuim da Universidade do Minho pela deposição de filmes finos de silício amorfo.

Também não podia deixar de agradecer a todos os meus amigos. Sem o vosso apoio, a vida não tem muito sentido. Um abraço ao Daniel Araújo, Ruben Pascoal e ao Filipe Brito, por estarem sempre presentes. O carinho especial também para Pedro Carapinha, Sara Malveiro, Rita Carapinha, Ana Cristina, Nuno Zeferino, Samuel Guerreiro, Manuel Guerra e Manuel Nabeiro. Todos vós sois para mim como uma segunda família.

*A todos vós um **MUITO OBRIGADO**.*

## Resumo

Foi proposto no âmbito da tese do Mestrado em Engenharia dos Materiais o desenvolvimento de um sistema para a caracterização de sensores de posição produzidos sobre substrato flexível, mais concretamente em Kapton<sup>®</sup>. A principal vantagem do substrato ser flexível é poder ser conformado a superfícies não planas e que no caso deste tipo de sensores permite, por exemplo, anular a aberração da curvatura de campo duma lente esférica. Os substratos flexíveis podem ser utilizados em módulos fotovoltaicos para cobertura de telhas, existindo ainda muito desenvolvimento em electrónica flexível com vista aos *e-book* [1].

Para realizar este trabalho, foram consideradas duas etapas distintas e independentes; a primeira envolve o fabrico dos sensores e numa segunda etapa o projecto e a construção do equipamento para caracterizar os sensores de posição flexíveis em função da flexão mecânica.

Embora as duas etapas tivessem um arranque simultâneo, foi o fabrico dos sensores flexíveis que apresentou maiores dificuldades. O objectivo seria uma “receita” existente de sensores de posição, os quais demonstraram bons resultados em substrato de vidro [2]; contudo, quando foi aplicada a substratos poliméricos começaram a surgir problemas: a utilização de vidro para segurar o substrato, ao longo das etapas de fabrico no equipamento, levava a uma adesão entre ambos. Após ter-se experimentado o depósito das poliamidas, para evitar ter resíduos entre eles, observou-se que este ficava com uma espessura demasiado pequena e foi com a desmontagem do suporte de vidro do substrato em todos os passos para uma lavagem e secagem que o problema se atenuou. Este procedimento estava a ser evitado para manter o substrato plano devido a tensões que são geradas na altura dos depósitos, especialmente no depósito do silício.

Foram fabricados vários sensores no entanto verificou-se que não trabalhavam correctamente. Foi através da análise das imagens obtidas por SEM dos eléctrodos que se observou que o crómio ficava fissurado após o depósito, fenómeno até então desconhecido. Passou-se a utilizar alumínio como material para os eléctrodos, contudo, na sequência do

depósito de silício, este fissurava e apresentava falta de aderência. Para eliminar o efeito procedeu-se ao fabrico de eléctrodos compostos de alumínio e crómio mas sem resultados satisfatórios.

Foi decidido realizar o depósito de silício na Universidade do Minho onde, com sucesso, depositam silício sobre alumínio. Os sensores eram realizados nos suportes de 10x10 cm e foi necessário proceder à criação de novas máscaras para um sistema de 3,5x3,5 cm que são as dimensões utilizadas nos equipamentos da Universidade do Minho. O depósito de alumínio correu normalmente e foram terminados os sensores contudo não havia sinal nos eléctrodos, talvez porque só foram realizados três diferentes e o processo não tenha sido optimizado.

Dada a existência de novas máscaras, os sensores passaram a ser produzidos no equipamento do CEMOP em detrimento do DCM. Como o equipamento está preparado para substratos de 4x4 cm, não se colocou problema dimensional. Embora ainda houvesse sensores em que o silício não aderira ao alumínio, conseguiu-se um sensor a trabalhar no equipamento de caracterização.

O projecto do equipamento de caracterização de sensores flexíveis consistiu no desenvolvimento de um sistema que pudesse possibilitar a flexão do sensor e a sua caracterização. A solução implementada permite realizar uma flexão linear desde um estado plano até a uma flexão de curvatura de raio 2 cm, mas o equipamento tem condições, e espaço, para melhoramentos na secção de flexão dos sensores.

O projecto consistiu em três grandes áreas: mecânica, electrónica e informática. Na área da mecânica, optou-se por fixar o laser a um eixo, sendo o feixe luminoso perpendicular ao eixo, para tal, o suporte para o laser consiste em uma calha em 'V', e como a maioria dos módulos/lasers possui uma forma cilíndrica, este formato faz com o laser fique automaticamente alinhado com a calha e estando esta perpendicular ao eixo de rotação, consequentemente, o feixe luminoso do laser também fica.

Pretendia-se uma maneira de fixar os sensores mas também que o deslocamento do feixe laser incidente tivesse deslocamentos equivalentes; a solução foi construir um suporte para os sensores em que estes ficassem com raios de curvatura fixos. Este suporte possui ranhuras circulares concêntricas de raio 2 cm até 14 cm e uma ranhura plana à 15 cm do eixo, assim qualquer posição em que o sensor se encontra-se o deslocamento é sempre igual excepto na plana, onde os dados tem de ser corrigidos do efeito de curvatura.

O feixe laser incidente deveria poder realizar deslocamentos de cerca de  $5\text{ }\mu\text{m}$  na superfície do sensor e para ser possível, a 15 cm de distância, o deslocamento é tem de ser  $0,0019^\circ$  ou  $33,3\text{ }\mu\text{rad}$ . Como não existem motores com deslocamentos angulares tão baixos, foi necessário introduzir uma caixa redutora. As redutoras existentes com uma relação tão elevada (1:500) são de múltiplos carretos o que introduz folgas consideráveis; contudo o sistema desenvolvido para retirar as folgas atenua-as para um valor de 2% acima do valor de erro de posicionamento do motor. A precisão de posicionamento é cerca de 7%.

O motor utilizado é do tipo passo-a-passo que é comandado pela unidade de controlo. Esta unidade tem no seu interior um microprocessador que comunica com o computador através do protocolo RS-232. As suas funções envolvem o controlo do motor passo-a-passo e sua posição, controle do laser, comunicação, ganho dos amplificadores analógicos, conversores analógico para digital (ADC) e do conversor digital para analógico (DAC). Com esta electrónica, a unidade de controlo consegue: posicionar o laser, ligar/desligar o laser, aplicar uma tensão de polarização que pode variar entre -10 V e os 10 V, adquirir o valor do sinal através dos ADC e gerir o ganho dos amplificadores para obter o máximo de sinal.

No desenvolvimento do sistema de caracterização foi necessário criar um programa para a aquisição do sinal, este comunica com a unidade de controlo através do envio de frases de comando. Durante a aquisição é possível visualizar a evolução do sinal. Além do mencionado, o programa permite a exportação dos dados em formato compatível com folhas de cálculo.

## **Acrónimos**

PSD – Sensor de Posição (*Position Sensing Device / Position Sensitive Detector*)

MIS – Metal - Isolante - Semicondutor

UV – Radiação Ultravioleta

ADC – Conversor Digital para Analógico (*Analog to Digital Converter*)

DAC – Conversor Analógico para Digital (*Digital to Analog Converter*)

RISC – Computador com um reduzido número de instruções (*Reduzem Instrutiva Set. Computer*)

RMS – Valor Quadrático Médio (*Root Mean Square*)

R – Coeficiente de Correlação De Pearson



## Índice Temático

1. Sensores de Posição.....	15
1.1. Introdução .....	16
1.2 Sensores de Posição .....	17
1.2.1 Efeito Fotolateral.....	17
1.2.2 Detecção da Posição.....	22
1.2.3 Erro na Detecção da Posição.....	25
1.2.4 Resolução .....	27
1.2.5 Tempo de Resposta .....	30
1.3 Dispositivo MIS.....	34
1.3.1 Díodo MIS sob Iluminação .....	36
1.3.2 Díodo MIS versus Díodo PN .....	37
1.3.3 Silício Amorfo.....	38
1.4 Fabrico dos Sensores de Posição .....	39
1.4.1 Estrutura e Preparação dos Sensores.....	39
1.4.2 Técnicas Utilizadas no Fabrico dos Sensores .....	43
1.4.2.1 Fotolitografia .....	43
1.4.2.2 Evaporação Térmica assistida por Canhão de Electrões.....	46
1.4.2.3 Deposição Química de Vapores Assistida por Plasma.....	47
1.4.2.4 Erosão Húmida .....	49
1.4.2.5 Erosão Seca .....	50
1.5 Resultados da produção .....	51
1.5.1 Adesão do substrato ao vidro .....	51
1.5.2 Depósito de Poliamidas sobre o Vidro.....	53
1.5.3 Escolha da Espessura do Substrato .....	54
1.5.4 Eléctrodos.....	55
1.5.5 Depósito de Silício no ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’ .....	57
1.5.6 Depósito de Silício no sistema do CEMOP .....	58
1.5.7 Síntese do processo de produção dos sensores .....	59
2. Desenvolvimento e projecto do sistema de Caracterização de Sensores de Posição Flexíveis.....	62
2.1 Projecto Mecânico .....	63
2.2 Projecto Eléctrico.....	72

2.3 Projecto de Informática.....	76
2.4 Resultado do sistema de caracterização de sensores .....	80
3. Resultados e conclusões .....	84
3.1 Validação da Plataforma.....	84
3.2 Conclusões .....	85
3.3 Trabalho Futuro .....	88
4. Bibliografia.....	90

## Índice de Figuras

Figura n.º 1 – Ilustração da experiência realizada por Schottky em 1930, quando da descoberta do efeito fotolateral .....	18
Figura n.º 2 – Ilustração do efeito fotolateral de um PSD a 1D. ....	19
Figura n.º 3 – Modelo proposto de funcionamento dum sensor PSD a 1D. ....	21
Figura n.º 4 – (a) Representação esquemática de um PSD a 1D e (b) o respectivo circuito básico de conversão .....	23
Figura n.º 5 – Referenciais da posição do feixe laser no sensor. ....	24
Figura n.º 6 – Representação esquemática do erro na detecção da posição .....	25
Figura n.º 7 – (a) Com centróide do feixe luminoso todo na zona activa a determinação da posição é correcta. (b) Como o centróide do feixe luminoso não está todo na zona activa existe um erro na determinação da posição. ....	26
Figura n.º 8 – Modelo de ruído do sensor de posição associado a um amplificador corrente/tensão .....	28
Figura n.º 9 – Resposta típica do sensor a um sinal em degrau. ....	31
Figura n.º 10 – Diagrama de bandas para uma estrutura ideal de MIS em equilíbrio. ....	34
Figura n.º 11 – Efeitos nas bandas da tensão aplicada; $\xi$ representa o campo eléctrico resultante da aplicação da tensão de polarização, $V$ .....	35
Figura n.º 12 – Díodo MIS sob iluminação .....	36
Figura n.º 13 – (a) Distribuição da densidade de estados para o silício cristalino e as suas (b) bandas de energia; (c) distribuição da densidade de estados para o silício amorfo sendo que devido aos estados localizados não existe bandas de energia definidas. $E_c$ e $E_v$ correspondem à <i>energia crítica</i> para as bandas de condução e valência. ....	39
Figura n.º 14 – Sensor MIS 1: (a) estrutura utilizada, e (b) fotografia de um dos sensores produzidos. ....	40

Figura n.º 15 – Substrato de Kapton, limpo e fixado a uma placa de vidro .....	40
Figura n.º 16 – Esquema exemplificativo de um processo de fotolitografia .....	44
Figura n.º 17 – Máscaras utilizadas no fabrico dos sensores de posição.....	46
Figura n.º 18 – Sistema de evaporação por canhão de electrões: (a) Representação esquemática do sistema e (b) fotografia do sistema.....	46
Figura n.º 19 – Sistema de plasma por r.f. (Simétrico e Assimétrico, respectivamente). .....	48
Figura n.º 20 – Plasma de silano, gerado entre dois eléctrodos de r.f., idêntico à configuração de plasma utilizado na técnica PECVD.....	48
Figura n.º 21 – Erosão isotrópica e anisotrópica .....	50
Figura n.º 22 – Imagens de SEM da face posterior .....	52
Figura n.º 23 – Imagens de SEM da face anterior .....	52
Figura n.º 24 – (a) Depósito da poliamida, e (b) Spin do substrato com o depósito da poliamida.....	54
Figura n.º 25 – Substratos de (a) 50µm e (b) 75µm; ambos os substratos com processos iguais .....	54
Figura n.º 26 – Imagens de SEM de um PSD na zona do (a) eléctrodo do crómio e (b) da interface de crómio e silício .....	55
Figura n.º 27 – Imagens de SEM do depósito de Silício sobre Alumínio, (a) zona de interface, Kapton e o eléctrodo e (b) ampliação do depósito de silício. (c) Sistema de deposição do Silício no Dep. Materiais.....	56
Figura n.º 28 – Fotografia do (a) sistema de deposição do ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’, do ‘Departamento de Física’ da ‘Universidade do Minho’ e (b) da câmara de deposição .....	57
Figura n.º 29 – Máscaras utilizadas no fabrico dos sensores de posição para o sistema do ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’ .....	57
Figura n.º 30 – Sensores terminados e individualizados. ....	59

Figura n.º 31 – Esquemático do Aparelho de Caracterização dos Sensores de Posição Flexíveis .....	63
Figura n.º 32 – Fotografia do suporte dos sensores .....	64
Figura n.º 33 – Ilustração do funcionamento do motor passo-a-passo, em deslocamentos de meios-passos.....	65
Figura n.º 34 – Dados técnicos do motor passo-a-passo, fornecido pela RS.....	66
Figura n.º 35 – Fotografia do interior da caixa redutora. ....	67
Figura n.º 36 – Esquema básico do sistema utilizado para retirar as folgas e as medidas existentes no sistema .....	68
Figura n.º 37 – Suporte do laser (a) na sua posição extrema superior e (b) na sua posição extrema inferior .....	70
Figura n.º 38 – Fotografia do mecanismo para retirar as folgas da caixa redutora. ....	71
Figura n.º 39 – (a) Representação do Aparelho de Caracterização de PSD Flexíveis e (b) sua fotografia.....	71
Figura n.º 40 – Esquemático do circuito electrónico de obtenção de sinal do sensor de posição.....	73
Figura n.º 41 – Curva de resposta dum filtro de 1ª ordem.....	75
Figura n.º 42 – Fluxograma simplificado do programa da unidade de controlo. ....	77
Figura n.º 43 – Ecrã do programa de caracterização de sensores de posição flexível.....	79
Figura n.º 44 – Montagem experimental .....	81
Figura n.º 45 – Gráfico da média dos deslocamentos angulares em cada varrimento, e seu respectivo erro, em função do n.º de varrimentos.....	82
Figura n.º 46 – Valores obtidos para um sensor de posição comercial com o ‘Aparelho de Caracterização de PSD’ .....	84

## Índice de Tabelas

Tabela n.º 1 – Síntese do processo de fabrico de um sensor de posição flexível .....	42
Tabela n.º 2 – Condições dos três depósitos de a-Si:H realizados no ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’ .....	58
Tabela n.º 3 – Condições do depósito de a-Si:H realizados no CEMOP .....	59
Tabela n.º 4 – Historial das fases de fabrico de sensores de posição sobre Kapton.....	60
Tabela n.º 5 – Sequência eléctrica para o motor executar movimentos angulares, no modo de <i>meios-passos</i> ( $V_{cc}$ representa a tensão de alimentação do motor).....	66
Tabela n.º 6 – Características do motor passo-a-passo RS stock no.440-458 .....	66
Tabela n.º 7 – Deslocamento Linear em Função do Raio de Curvatura das Ranhuras. ....	67
Tabela n.º 8 – Dados técnicos do microprocessador PIC18F4550 .....	72
Tabela n.º 9 – Valores máximos de corrente admissível no sensor e resolução correspondente em função da amplificação do sinal.....	76
Tabela n.º 10 – Lista de comandos do Aparelho de Caracterização de PSD’s.....	78
Tabela n.º 11 – Diferença ente posições consecutivas, sua média e desvio padrão. ....	81
Tabela n.º 12 – Deslocamentos angulares consecutivos realizado pelo laser, sua média e desvio padrão. ....	82

# *Capítulo 1*

## **Sensores de Posição**

## 1.1. Introdução

O tema desta dissertação é “Desenvolvimento de uma Plataforma Optoelectrónica para Caracterização de Sensores de Posição Flexíveis”.

As etapas do fabrico consideradas para a produção destes sensores são suportados pelos procedimentos definidos na tese Doutorado do Doutor Hugo Manuel Brito Águas [2] que estudou o fabrico e funcionamento dos sensores de posição (PSD - Position Sensing Device) em substrato de vidro, utilizando a estrutura MIS (Metal / Isolante / Semicondutor).

No seu trabalho de Doutorado e após o desenvolvimento do PSD MIS a 1D (uma Dimensão), estudou a sua aplicação em sensores de posição tipo 3D [3] com topologia MIS, estando estes, neste momento, na fase de fabrico [4]. Um sensor de posição tipo 3D é um conjunto de PSD's dispostos lado a lado e com um espaçamento igual. A finalidade deste tipo de sensores é obter o perfil de uma linha luminosa projectada sobre um objecto e assim relacionar com o contorno do objecto gerando uma imagem tridimensional. O uso de PSD 1D para obter sensores tipo 3D também é feito no *Instituto de Física de Cantabria*, Espanha [5], contudo, há quem prefira a utilização de CCD's (*charge coupled devices*) para obter a posição dum feixe luminoso [6]. Para a detecção de posição de UV (ultravioletas) 212nm, a *Division of Quantum Science and Engineering* no Japão [7], fabrica um sensor que inclui no seu fabrico as duas topologias anteriores, pois possuem sensores tipo 'pixel', como no caso dum CCD; no entanto estes estão interligados por um conjunto de resistências, como se fosse a camada resistiva dum PSD (serão dados detalhes mais adiante). O resultado é um sensor em que se pode afirmar que se trata dum híbrido PSD 1D.

Parte do trabalho desenvolvido e apresentado neste documento visou a produção sensores de posição fabricados num substrato flexível. A principal vantagem do substrato ser flexível é poder ser conformado a superfícies não planas e que no caso deste tipo de sensores permite acompanhar uma curva de maneira a assim anular a aberração da curvatura de campo



duma lente esférica. Outro exemplo da utilidade dos substratos flexíveis é em módulos fotovoltaicos para cobertura de telhas. Existe ainda muito desenvolvimento em electrónica flexível com vista aos *e-book* [1].

Este documento encontra-se dividido em duas secções distintas. Na primeira, as fases de produção dos sensores de posição em substrato flexível. Na segunda, é descrito o equipamento para caracterizar os sensores de posição flexíveis em função da sua deformação mecânica.

O trabalho realizado teve por base os resultados do doutoramento do Doutor Hugo M.B. Águas e todos os parâmetros utilizados, quer o fabrico dos sensores quer o projecto do equipamento de caracterização, foram baseados nas conclusões da sua dissertação de doutoramento. Tentou-se não alterar a ‘receita’ de fabrico dos sensores PSD para servir de base de comparação entre sensores produzidos sobre diferentes substratos.

Seguidamente será abordado a teoria dos sensores de posição, modelo de funcionamento e limitações. Neste capítulo ainda serão descritos os princípios físicos dos sensores de posição, os seus modos de funcionamento, como são construídos e as técnicas utilizadas.

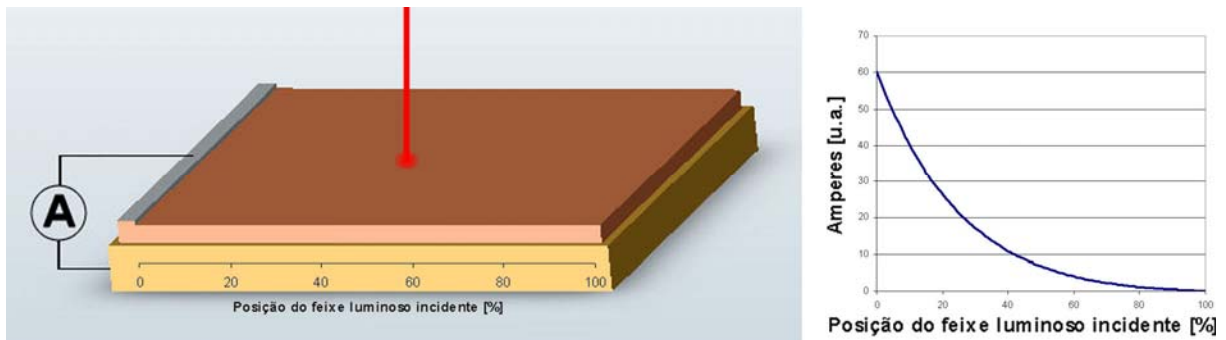
## **1.2 Sensores de Posição**

Nesta secção vai ser abordado o funcionamento de um sensor de posição e as suas limitações. O efeito fotolateral é o princípio físico básico responsável pela detecção da posição dum feixe luminoso incidente no sensor.

### **1.2.1 Efeito Fotolateral**

O sensor de posição baseia-se no princípio do efeito fotolateral, observado pela primeira vez por Schottky em 1930 [8]. A detecção da posição do feixe luminoso no sensor é medida através da variação da tensão ou da corrente no sensor.

Na altura, Schottky andava a estudar as junções Cu-Cu<sub>2</sub>O e observou que quando um feixe de luz iluminava a junção, pares de electrão-buraco eram gerados no dióxido de cobre (CuO<sub>2</sub>) e separados pelo campo eléctrico da junção. Parte dos electrões conseguia alcançar o eléctrodo, mas a maioria perdia-se por recombinação com os buracos armazenados no cobre (Cu). Schottky observou que a corrente medida no amperímetro aumentava exponencialmente quando o feixe luminoso se aproximava do eléctrodo, fenómeno explicado pelo aparecimento de uma tensão fotolateral, conforme ilustrado na Figura n.º 1.



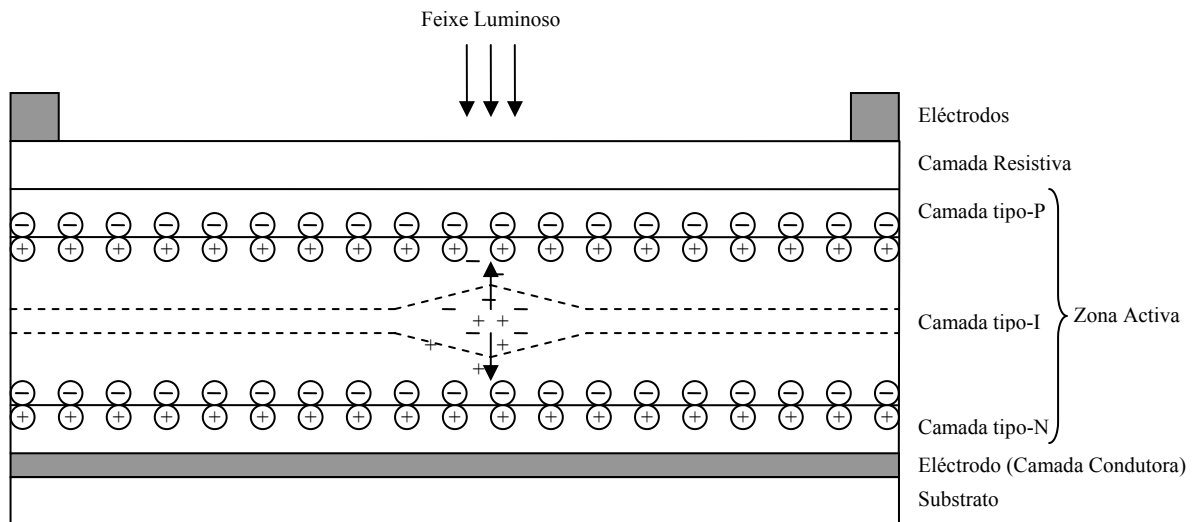
**Figura n.º 1 – Ilustração da experiência realizada por Schottky em 1930, quando da descoberta do efeito fotolateral**

Em 1957, Wallmark realizou uma considerável pesquisa em torno deste tipo de sensor com vista a aplicações de inspecção óptica, medições e controlo [9]. Com base no efeito fotolateral surgiram dois tipos de sensores de posição a 1D: os sensores mono-eléctrodo e os sensores bi-eléctrodo. Os primeiros, como o nome indica, só possuem um eléctrodo, sendo esta a configuração mais simples. Por seu lado, os sensores bi-eléctrodos utilizam dois eléctrodos para a detecção da posição, conseguindo uma maior precisão, em particular na região dos eléctrodos.

O sensor possui, para além do substrato, três camadas de funcionamento distinto: a camada condutora, a zona activa e a camada resistiva. Na Figura n.º 2 está representada esquematicamente uma configuração (a mais usual) de um sensor PSD de uma dimensão. Embora se possa variar a configuração do sensor em relação à localização dos eléctrodos e à

localização da camada condutora e resistiva em relação à zona activa, a estrutura básica é inalterável.

Consideremos que o sensor é formado pela seguinte configuração – Substrato/Camada Condutora/Zona Activa/Camada Resistiva. Os electrões são atraídos para a camada resistiva e os buracos para a camada condutora.



**Figura n.º 2 – Ilustração do efeito fotolateral de um PSD a 1D.**

A zona activa é formada por camadas justapostas que são do tipo P, tipo I e tipo N, vulgarmente dito por PIN. Este tipo de configuração é comum quando se utiliza silício amorfo, uma vez que o campo eléctrico formado pela junção PN é demasiado reduzido para haver separação das cargas fotogeradas.

O feixe luminoso atravessa a camada resistiva, que possui uma espessura suficientemente reduzida para ser considerada transparente (Lei de Beer-Lambert<sup>1</sup>). O feixe

<sup>1</sup> A Lei de Beer-Lambert diz que a radiação luminosa é atenuada, numa relação exponencial, ao longo do seu percurso pelo material; a expressão matemática é:  $I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$ , em que I representa a intensidade luminosa a uma distância x da interface,  $I_0$  a intensidade luminosa incidente,  $\alpha$  o coeficiente de atenuação e x a distância percorrida no material. O Coeficiente de atenuação pode ser composta de componentes tais como a absorção, dispersão entre outras.

luminoso é então colectado na zona activa, produzindo cargas eléctricas. Estas cargas, por seu lado, são separadas devido ao campo eléctrico existente na zona activa.

Uma vez na camada resistiva, as cargas encontram dois percursos para os eléctrodos com resistividades diferentes (excepto se o feixe luminoso se encontra no centro da zona activa). O movimento das cargas, i.e., a corrente eléctrica fotogerada é então colectado nos eléctrodos. A expressão da corrente fotolateral, que é função da posição do feixe luminoso e do tempo de resposta do dispositivo, toma a seguinte expressão [10]:

$$i(x, t) = I \cdot \exp(-\alpha \cdot \omega_0 \cdot t) \cdot \frac{\sinh(\alpha \cdot x)}{\sinh\left(\alpha \cdot \frac{L}{2}\right)} \quad (1)$$

em que  $I$  é a constante da amplitude da corrente fotodetectada,  $\alpha$  é o parâmetro de decaimento (*fall-off parameter*),  $\omega_0$  é tempo de resposta espacial,  $L$  o comprimento do sensor e ' $x$ ' a posição do feixe luminoso incidente ( $-L/2 < x < L/2$ ).

O parâmetro de decaimento,  $\alpha$ , depende das características da camada sensitiva e das condutivas que constituem o sensor e define-se essencialmente como o produto da resistência da camada resistiva pela condutividade transversal da estrutura. Para a linearidade dos dispositivos ser máxima, o parâmetro  $\alpha$  deve tender para zero, simplificando a expressão (1) para:

$$i(x) = I \cdot \frac{x}{L/2} \quad (2)$$

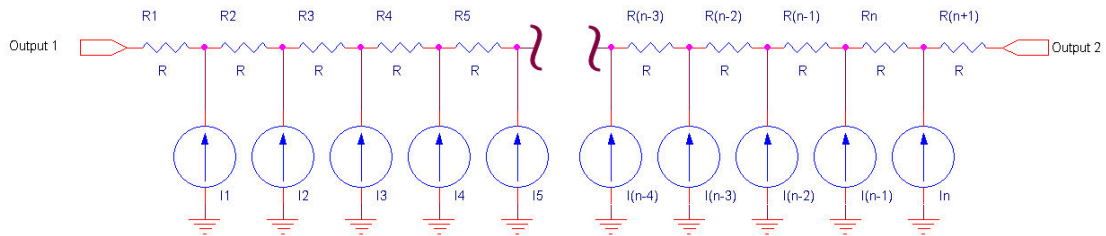
Para uma estrutura do tipo MIS (Metal-Isolador-Semicondutor), a ausência de uma camada semicondutora (tipicamente a camada P),  $\alpha$  toma a seguinte expressão:

$$\alpha = \rho_s \cdot \sigma_d \cdot \frac{2a}{d} \cdot \frac{2a}{d_r} \quad (3)$$

em que  $\rho_s$  é a resistência da camada resistiva,  $\sigma_d$  a condutividade no escuro da camada fotosensível,  $d$  a espessura da camada fotosensível,  $d_r$  a espessura da camada resistiva e ' $a$ ' o raio do feixe de luminoso incidente. Para os sensores MIS os valores típicos são os seguintes:

$\rho_s = 5 \text{ } \Omega/\square$ ;  $d_r = 70 \text{ } \text{\AA}$ ;  $d = 6000 \text{ } \text{\AA}$ ;  $a = 0,5 \text{ mm}$ ;  $\sigma_d = 10^{-11} (\Omega.\text{cm})^{-1}$ , o que resulta num parâmetro de decaimento,  $\alpha$ , de 0,012. Como este valor é menor que a unidade, podemos garantir que se trata de um sensor linear.

Um modelo proposto [11] assume a existência de fontes de corrente infinitesimais ao longo da zona activa e uma malha de resistência a interligá-las. Modificando o modelo proposto, considerando desprezável o valor da resistência da interface, obtemos um modelo em que a malha se simplifica em uma única resistência a interligar as fontes de corrente, conforme visualizado na Figura n.º 3.



**Figura n.º 3 – Modelo proposto de funcionamento dum sensor PSD a 1D.**

A carga fotogerada numa área infinitesimal,  $I_i$ , é proporcional à intensidade do feixe luminoso na mesma área; assim o perfil da densidade de carga espacial na camada resistiva é proporcional ao perfil da intensidade do feixe luminoso incidente. Considerando que a resistência interelectrodos é uniforme em todo o comprimento da zona activa e como as cargas fotogeradas fluem para os electrodos em função do percurso resistivo, a corrente colectada num electrodo numa determinada área infinitesimal corresponde à de um divisor de corrente em que as respectivas resistências são função da distância que separa esse ponto aos electrodos. A soma total das fotocorrentes num electrodo toma a seguinte forma:

$$I_{O1} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \cdot (R_{ie} - iR)}{\sum R} \quad (4)$$

$$I_{O2} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \cdot iR}{\sum R} \quad (5)$$

em  $I_{O1}$  é a corrente colectada no eléctrodo 1,  $I_{O2}$  é a corrente colectada no eléctrodo 2,  $I_i$  são cada uma das *cargas fotogerada numa área infinitesimal*,  $R$  é a resistência entre fontes de corrente e  $n$  o número de fontes de corrente consideradas. Cada uma das equações é semelhante à equação de um centróide o que implica que a determinação da posição seja em função do centróide do feixe luminoso incidente e não do máximo da intensidade, tal como se verifica na prática. Assim, o sensor não consegue determinar a posição de dois feixes luminosos incidindo simultaneamente no sensor.

O sinal obtido nos eléctrodos pode ser medido como tensão ou corrente. Contudo, está demonstrado que a medição da corrente fotogerada apresenta melhores resultados em termos de linearidade, *offset* e largura de banda [12]. A medição do sinal por tensão implica a necessidade de aplicar uma resistência de carga, que influencia o funcionamento do sensor tal como é observado [13].

De seguida serão abordadas as questões práticas relacionadas com o funcionamento do sensor de posição.

### 1.2.2 Detecção da Posição

Quando um feixe luminoso incide sobre a zona activa do sensor de posição é produzida uma fotocorrente que é captada pelos eléctrodos. A montagem típica do sensor é visualizada na Figura n.º 4a. A fotocorrente é convertida em tensão ( $V_1$  e  $V_2$ ) pelos amplificadores de transimpedância (Figura n.º 4b) em a resistência  $R_f$  estabelece o factor de proporcionalidade entre ambos. A tensão de saída dos amplificadores relaciona-se com a corrente através das seguintes expressões:

$$V_1 = R_f \cdot I_1 \tag{6}$$

$$V_2 = R_f \cdot I_2 \tag{7}$$

O condensador  $C_f$  cria um filtro para deixar passar as baixas frequências, um passa-baixo. No equipamento desenvolvido este condensador não foi utilizado por existir um filtro passa-baixo após o amplificador de transimpedância.

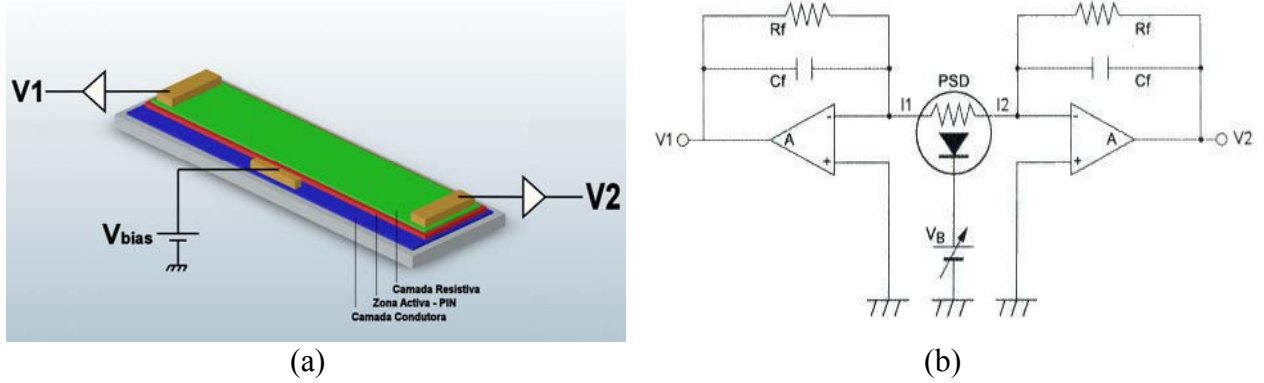


Figura n.º 4 – (a) Representação esquemática de um PSD a 1D e (b) o respectivo circuito básico de conversão

Para a obtenção da posição do feixe luminoso incidente pode-se considerar a origem no centro do sensor ou num dos eléctrodos, conforme ilustrado na Figura n.º 5.

A) Considerando a origem no centro do sensor [14]

Sendo que a soma das correntes  $I_1$  e  $I_2$  é  $I_0$ , temos para cada uma das correntes a seguinte expressão:

$$I_1 = \frac{\frac{L}{2} - X_A}{L} \cdot I_0 \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{\frac{L}{2} + X_A}{L} \cdot I_0 \quad (9)$$

em que  $L$  é o comprimento da zona activa ente os eléctrodos e  $X_A$  a posição do feixe luminoso no sensor medido em relação ao centro do centro. Utilizando as equações (8) e (9), pode-se obter:

$$X_A = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \cdot \frac{L}{2} \quad (10)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{L - 2X_A}{L + 2X_A} \quad (11)$$

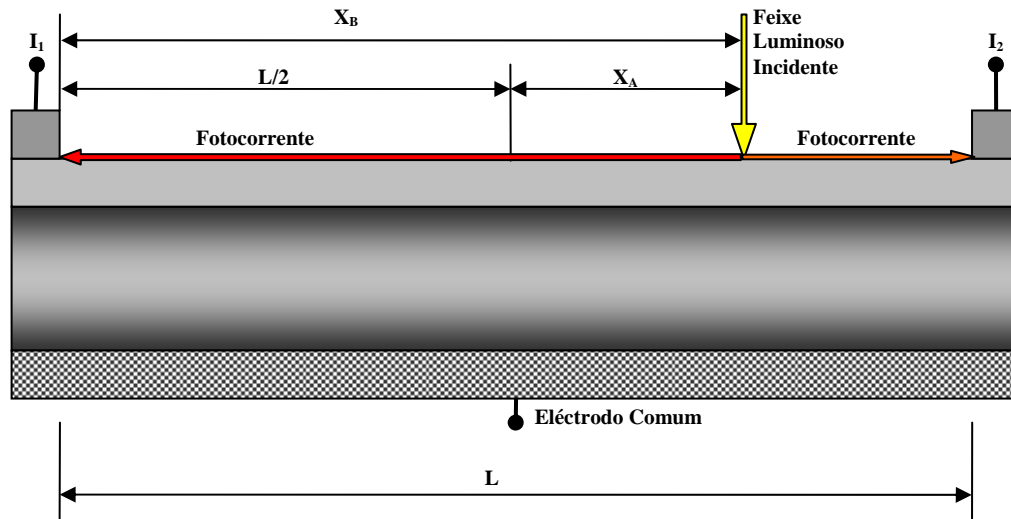


Figura n.º 5 – Referenciais da posição do feixe laser no sensor

B) Considerando a origem num dos eléctrodos [14]

Neste caso, cada uma das correntes é expressa da seguinte forma:

$$I_1 = \frac{L - X_B}{L} \cdot I_0 \quad (12)$$

$$I_2 = \frac{X_B}{L} \cdot I_0 \quad (13)$$

em que  $X_B$  a posição do feixe luminoso no sensor em relação ao eléctrodo. Relacionando as duas expressões acima, obtêm-se:

$$X_B = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \cdot \left(1 + \frac{L}{2}\right) \quad (14)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{L - X_B}{X_B} \quad (15)$$

Em qualquer uma das situações, a relação entre as correntes fotogeradas e as tensões, é dada por:

$$V_1 = R_f \cdot I_1 \quad (16)$$

$$V_2 = R_f \cdot I_2 \quad (17)$$

em  $R_f$  é a resistência de realimentação dos amplificadores de transimpedância.

Um dos parâmetros mais importantes num sensor de posição é o erro entre a posição medida e a posição real do feixe luminoso no sensor. Este assunto será tratado de seguida.



### 1.2.3 Erro na Detecção da Posição

Ser capaz de detectar a posição do feixe luminoso na sua zona activa é a característica principal de um PSD, valor esse obtido através das medidas em cada um dos seus eléctrodos. Contudo, para uma posição do feixe luminoso, a posição medida varia, ligeiramente, de sensor para sensor.

O centro eléctrico do sensor é encontrado quando as correntes dos eléctrodos são iguais, situação que corresponde em princípio a ter o feixe luminoso incidente na posição central; sendo esta posição, também, o zero do referencial.

A forma de determinar este erro, depois de encontrado o centro eléctrico do sensor, é deslocar o feixe luminoso uma determinada distância conhecida. A diferença entre o valor correspondente à posição real e o determinado pelas expressões da posição (equação 3 ou 7) é o *Erro na Detecção da Posição*,  $\varepsilon$ , com a seguinte expressão:

$$\varepsilon = X_i - X_m \quad (18)$$

Na Figura n.º 6 está representado esquematicamente o erro na detecção da posição, em que  $X_i$  é a posição do feixe luminoso incidente e  $X_m$  é a posição medida.

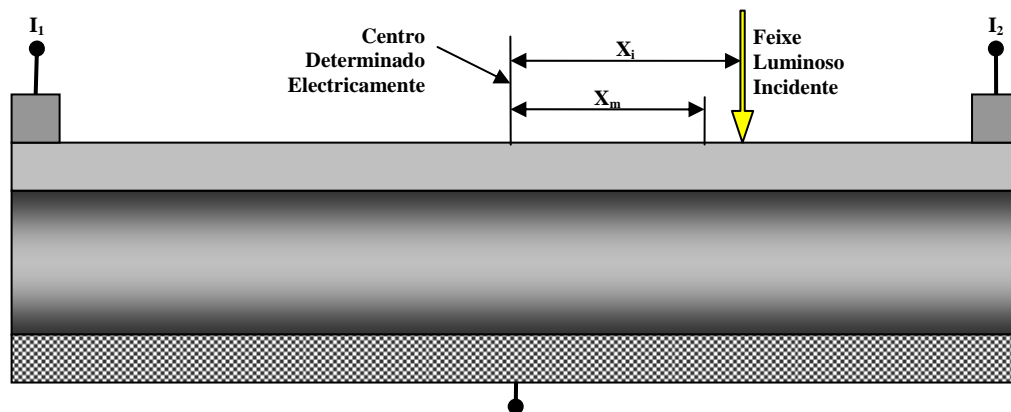
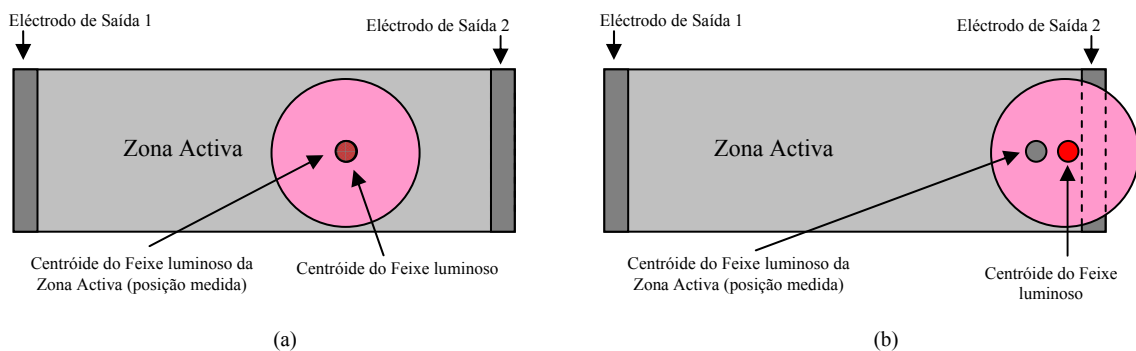


Figura n.º 6 – Representação esquemática do erro na detecção da posição

Este desvio em relação ao valor real da medida pode ser devido à não homogeneidade da camada resistiva. Se a resistência não for uniforme em todo o comprimento do sensor, as correntes fotogeradas num determinado ponto encontram caminhos resistivos não

proporcionais à sua posição fazendo que a determinação da posição do feixe luminoso incidente não seja correcto.

Outro factor de erro na detecção da posição está relacionado com a maneira como se ilumina o sensor com o feixe luminoso. Quando a totalidade do feixe luminoso incidente se encontra na zona activa, o *centróide do feixe luminoso na zona activa* é coincidente com o *centróide da intensidade luminosa*, fazendo com que a determinação da posição seja correcta como ilustrado na Figura n.º 7(a). No entanto, quando o feixe luminoso incidente se aproxima dum eléctrodo de saída de tal forma que parte deixa de estar na zona activa, os centróides deixam de ser coincidentes. Como a determinação da posição é obtida através do centróide e estando estes desencontrados, o valor da posição não é correcto, como visualizado na Figura n.º 7(b). Em vista do exposto, para minimizar os erros na detecção da posição do feixe luminoso incidente, a totalidade da zona activa não deverá ser utilizada por causa do efeito de não iluminação total da zona activa pelo feixe luminoso, conforme ilustrado através da Figura n.º 7. Os fabricantes recomendam que somente 75% da zona activa seja utilizada, para sensores menores que 12 mm, e 90% se forem maiores que 12 mm.



**Figura n.º 7 – (a) Com centróide do feixe luminoso todo na zona activa a determinação da posição é correcta. (b) Como o centróide do feixe luminoso não está todo na zona activa existe um erro na determinação da posição.**

A linearidade de um sensor de posição é um parâmetro importante porque indica o grau de uniformidade da medida com a posição real. A expressão para a obtenção do erro da linearidade,  $\sigma_e$ , é a seguinte [15]:

$$\sigma_e = \frac{2S_m}{F} \quad (19)$$

em que  $S_m$  é o desvio padrão da medida e  $F$  a escala total da medida. Em termos práticos, considera-se que dispositivos aceitáveis possuem valores do erro de linearidade inferiores a 15 % [16].

#### 1.2.4 Resolução

A resolução de um sensor de posição compreende-se como sendo o deslocamento mínimo detectável do feixe luminoso, na sua zona activa. Através da expressão da posição (equação 6), derivando a corrente de um eléctrodo em função do deslocamento, obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{dI}{dX} = \frac{I_0}{L} \quad (20)$$

em que  $I_0$  representa a corrente total dos eléctrodos e  $L$  o comprimento do sensor. Considerando que  $dI$  é a corrente de ruído do sensor ( $I_n$ ) então  $dX$  é o deslocamento mínimo detectável do feixe luminoso ( $\Delta x$ ). Assim sendo, o valor de  $\Delta x$  é dado pela seguinte expressão:

$$\Delta x = I_n \cdot \frac{L}{I_0} \quad (21)$$

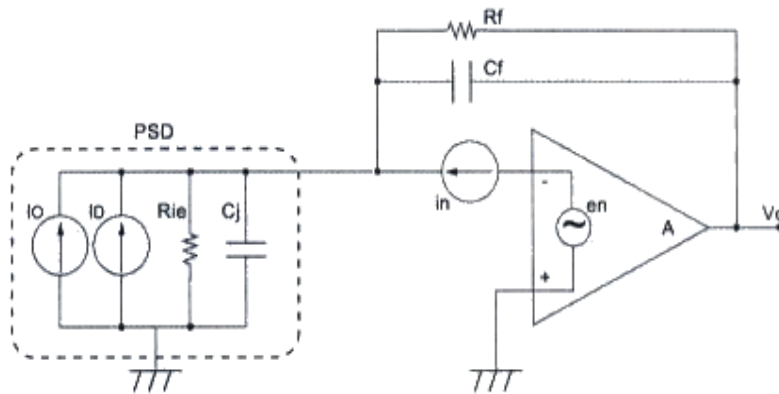
A resolução de um sensor de posição é proporcional à corrente de ruído e ao seu comprimento e inversamente proporcional à corrente total fotogerada. A *Corrente de ruído* ( $I_n$ ) tem como componentes o Ruído de Johnson da resistência inter eléctrodos, o Ruído de Schottky da corrente total fotogerada e a Corrente de Saturação ( $I_d$ ) do sensor. A corrente de saturação é única de cada dispositivo, sendo as outras componentes serão abordadas mais adiante. A *Corrente de ruído* total é o ‘valor quadrático médio’ (RMS) de todas as componentes do ruído:

$$I_n = \sqrt{I_J^2 + I_S^2 + I_D^2} \quad (22)$$

O sensor de posição da UDT Inc, modelo PIN LSC-30D, possui um comprimento de 30 mm, com uma resistência interelctrodos de 18k $\Omega$ , uma fotocorrente gerada de 7,2  $\mu$ A (para uma potência luminosa de 20  $\mu$ W), uma corrente de saturação de 1 nA e para a temperatura de 25°, possui uma resolução teórica de:

$$\left. \begin{aligned} I_J &= \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T}{R_{ie}}} = 21,4 \text{ pA} \cdot \text{Hz}^{-1/2} \\ I_S &= \sqrt{2 \cdot q \cdot (I_0 + I_D)} = 15,2 \text{ pA} \cdot \text{Hz}^{-1/2} \\ I_D &= 1000 \text{ pA} \end{aligned} \right\} \Delta x = I_n \cdot \frac{L}{I_0} = 4,2 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$$

em k é a constante de Boltzmann, T a temperatura (em Kelvin), B a largura de banda,  $R_{ie}$  é a resistência interelctrodos e q é a constante de carga eléctrica. Contudo, a montagem típica de um sensor de posição envolve o uso de amplificadores de transimpedância, tal como mostra a Figura n.º 4 (pág. 23). O modelo de ruído [14] de um sensor de posição com amplificador transimpedância encontra-se esquematizado na Figura n.º 8 e que  $I_0$  represente a fotocorrente total gerada,  $I_D$  a corrente de fundo,  $R_{ie}$  a resistência entre elctrodos,  $C_J$  a capacidade da junção,  $R_f$  a resistência de realimentação (ganho),  $C_f$  a capacidade da realimentação, ‘in’ o equivalente à corrente de ruído na entrada do amplificador, ‘en’ o equivalente à tensão de ruído na entrada do amplificador e  $V_0$  a tensão de saída do amplificador.



**Figura n.º 8 – Modelo de ruído do sensor de posição associado a um amplificador corrente/tensão**

A *Corrente de ruído* total possui ainda a componente do ruído do amplificador e o ruído electrónico ( $I_{en}$ ). A expressão final é:

$$I_n = \sqrt{I_J^2 + I_S^2 + I_D^2 + I_{en}^2} \quad (23)$$

De seguida serão abordados todas as componentes do ruído presentes num sensor de posição.

O *Ruído de Johnson* ou *Ruído térmico* [17], é o limite fundamental de medida numa resistência. Em qualquer resistência, a energia térmica produz movimento nas partículas carregadas, o que resulta em ruído. A potência deste movimento é dada pela seguinte expressão:

$$P = 4.k.T.B \quad (24)$$

em que  $k$  a constante de Boltzmann,  $T$  a temperatura em kelvins e  $B$  a largura de banda em Hz. Desenvolvendo a expressão da potência para a corrente obtem-se:

$$I_J^2 = \frac{4.k.T.B}{R} \quad (25)$$

em que  $R$  é a resistência. Considerações estatísticas mostram que o valor pico-a-pico do ruído é cinco vezes maior do que o valor quadrático médio (rms), mais de 99% do tempo. Assim, é comum multiplicar por cinco para obter o valor pico-a-pico, ficando a expressão do ruído da seguinte forma:

$$I_J^2 = \frac{20.k.T.B}{R} \quad (26)$$

O *Ruído de Schottky* é atribuído ao facto de uma corrente eléctrica ser constituída por partículas discretas. Nos semicondutores a corrente é formada pelo movimento individual de electrões e buracos. Contudo, a corrente medida é a média do movimento de portadores de carga. Visto que a corrente é formada por portadores de carga individuais, existe uma

flutuação no número de portadores e essa flutuação dá-se o nome de *Ruído de Schottky* (*Shot noise* ou *Schottky noise*). A corrente quadrática do ruído é dada pela seguinte expressão:

$$I_s^2 = 2 \cdot q \cdot I_{DC} \cdot B \quad (27)$$

em que  $q$  é constante de carga eléctrica,  $I_{DC}$  é a corrente continua e  $B$  a largura de banda. No caso do modelo de ruído do sensor PSD, temos que a expressão fica:

$$I_s^2 = 2 \cdot q \cdot (I_0 + I_D) \cdot B \quad (28)$$

O *Ruído Electrónico* deve-se ao facto de ser utilizado um amplificador corrente/tensão e todos os amplificadores injectam ruído na entrada. Este é um parâmetro intrínseco e dado pelos fabricantes. A expressão equivalente para a corrente de ruído da entrada é:

$$I_{en}^2 = \left( \frac{en}{R_{ie}} \right)^2 \cdot B \quad (29)$$

E, para a tensão de ruído da entrada é:

$$V_{en}^2 = \left( 1 + \frac{R_f}{R_{ie}} \right)^2 \cdot en^2 \cdot B \quad (30)$$

A expressão equivalente para a tensão de ruído da entrada devida à corrente é:

$$V_{in}^2 = R_f^2 \cdot in^2 \cdot B \quad (31)$$

### 1.2.5 Tempo de Resposta

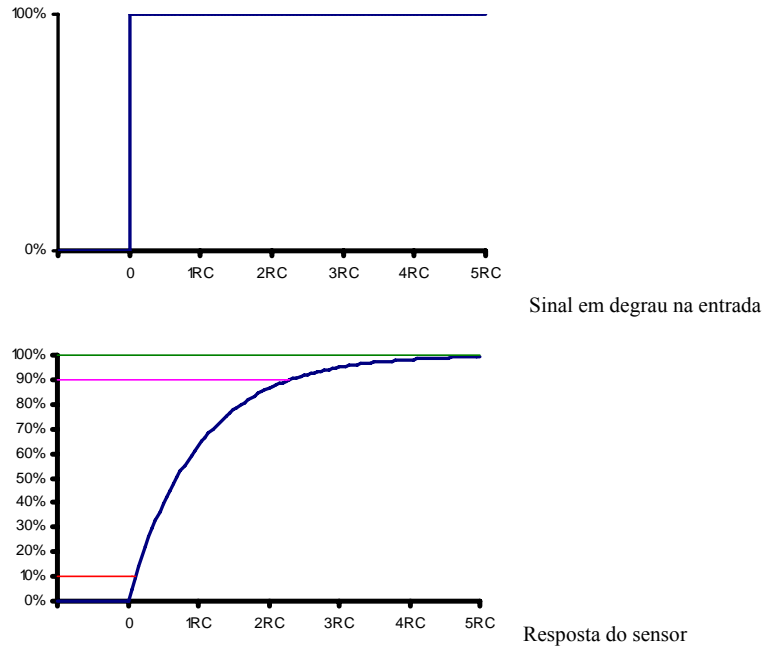
O *tempo de resposta*,  $t_r$ , é um parâmetro importante pois dá indicação de qual é a largura de banda a que o sensor pode trabalhar. No caso de um sensor de posição, o tempo de resposta reflecte-se na taxa de amostragem quando se analisa um feixe luminoso incidente.

O tempo de resposta é, usualmente, descrito como o tempo necessário para que o sinal da saída suba de 10% até 90% do seu valor final [17], quando na entrada existe um sinal em degrau, tal como ilustrado na Figura n.º 9.

Num sistema de 1ª ordem, o sinal de saída tem a seguinte estrutura:

$$V_m(t) = V_s.A.(1 - e^{-t/R.C}) \quad (32)$$

Sendo  $V_m$  o sinal de saída,  $V_s$  o sinal da entrada,  $A$  é a constante de proporcionalidade e  $R$  e  $C$  são a resistência e condensador equivalentes, respectivamente.



**Figura n.º 9 – Resposta típica do sensor a um sinal em degrau.**

Resolvendo a expressão anterior tem-se que  $t_{90\%} = 2,3.RC$  e  $t_{10\%} = 0,1.RC$ , assim como:

$$t_r = t_{10\%} - t_{90\%} \quad (33)$$

Então o tempo de resposta,  $t_r$ , é dado por:

$$t_r = 2,2.RC \quad (34)$$

O tempo de resposta, a frequência de corte e a constante  $RC$  (para um sistema de 1ª ordem) estão relacionados. A frequência de corte é definida como sendo a frequência que a tensão de saída se situa a cerca de 70%, ou quando da potência de saída do sinal é cerca de 50%, e é pode ser também chamada como sendo a “frequência a 3dB” ( $f_{3dB}$ ). Num sistema de 1ª ordem a frequência de corte é dada por:

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (35)$$

Substituindo a expressão do tempo de resposta na frequência de corte, obtém-se:

$$f_{3dB} = \frac{0,35}{t_r} \quad (36)$$

Existem três factores predominantes no tempo de resposta de um sensor:

- 1)  $t_{RC}$ , a constante de tempo RC que resulta da combinação sensor/circuito.
- 2)  $t_{drift}$ , o tempo necessário para colectar os portadores de carga na região de depleção.
- 3)  $t_{diffused}$ , o tempo necessário para colectar os portadores de carga fora da região de depleção.

O tempo de resposta final pode ser expressa como sendo o ‘valor quadrático médio’ de cada uma das componentes do tempo de resposta, sendo a sua expressão:

$$t_r = \sqrt{t_{RC}^2 + t_{drift}^2 + t_{diffused}^2} \quad (37)$$

Normalmente, a operar os sensores no modo fotovoltáico (sem tensão de polarização), o tempo de resposta é dominado pelo tempo necessário para colectar os portadores de carga fora da região de depleção, para área inferiores a 5 mm<sup>2</sup>. Para áreas superiores, pela constante de tempo RC. Se os sensores estiverem a trabalhar no modo fotocondutivo (com tensão de polarização) as três componentes contribuem para o tempo de resposta, excepto se o campo for elevado em que a contribuição dominante é,  $t_{drift}$ , o tempo necessário para colectar os portadores de carga na região de depleção. [18]

A constante de tempo RC pode ser calculada se forem conhecidos os respectivos valores da resistência e capacidade. No caso do sensor de posição, a resistência é dada pela resistência intereléctrodos, que depende do material e espessura do mesmo. A capacidade da junção está relacionada com a tensão de polarização  $V_{bias}$  (Figura n.º 4) pela seguinte expressão:



$$C_J = \frac{\varepsilon_{Si}\varepsilon_0 A}{\sqrt{2\varepsilon_{Si}\varepsilon_0\mu\rho(V_A + V_{bias})}} \quad (38)$$

em que  $\varepsilon_{Si}$  é a constante dielétrica do silício,  $\varepsilon_0$  é a permeabilidade do vácuo,  $A$  é a área da região de depleção,  $\mu$  é a mobilidade dos electrões,  $\rho$  é a resistividade do silício,  $V_A$  é o potencial do silício.

Com valores típicos,  $\varepsilon_{Si} = 12$ ,  $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m,  $A = 6,0 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>, (equivalente ao sensor da UDT Inc, modelo PIN LSC-30D),  $\mu = 0,92$  m<sup>2</sup>/(V·s),  $\rho = 10^8$  Ω.m,  $V_A = 0,77$  V [19] e o sensor a trabalhar em modo fotovoltaico ( $V_{bias} = 0$ V), a capacidade é cerca de  $C_J = 5,2 \times 10^{-14}$  F. Utilizando a equação 32 e a resistência intereléctrodos,  $R_{ie}$ , com o valor de  $18$  K Ω, obtem-se uma constante de tempo RC de,  $t_{RC} = 2$  ns.

Na montagem típica de um sensor de posição, a resistência para a constante de tempo inclui, além da resistência intereléctrodos,  $R_{ie}$ , a resistência de carga,  $R_L$ . A resistência,  $R$ , da constante de tempo é dada pela soma algébrica entre a resistência intereléctrodos e a resistência de carga do circuito. Analogamente, a capacidade da constante de tempo é dada pela soma algébrica da capacidade da junção,  $C_J$ , e da capacidade do circuito,  $C_T$ . Esta capacidade tem o nome de capacidade terminal.

$$t_{RC} = 2,2 \cdot (C_J + C_s)(R_{ie} + R_L) \quad (39)$$

A estrutura dos sensores de posição pretendidos é do tipo MIS (Metal – Isolante – Semicondutor). Na secção seguinte irá ser descrito o funcionamento deste dispositivo.

### 1.3 Dispositivo MIS

O sensor de posição utilizado neste trabalho possui uma estrutura MIS (Metal – Isolante – Semicondutor). Na Figura n.º 10 encontra-se o diagrama de bandas de um dispositivo MIS ideal, em que  $E_{Fm}$  representa o nível de Fermi no metal,  $E_{Fs}$  o nível de Fermi no semiconductor,  $q\Phi_m$  a função de trabalho do metal,  $q\Phi_s$  a função de trabalho do semiconductor,  $q\Phi_F$  a função de trabalho do semiconductor,  $\delta$  a espessura do material isolante,  $E_c$  a banda de condução e  $E_v$  a banda de valência.

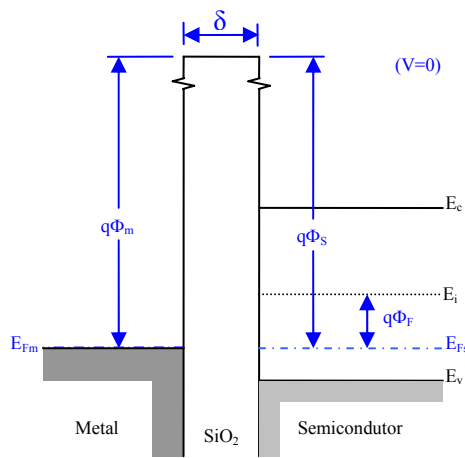
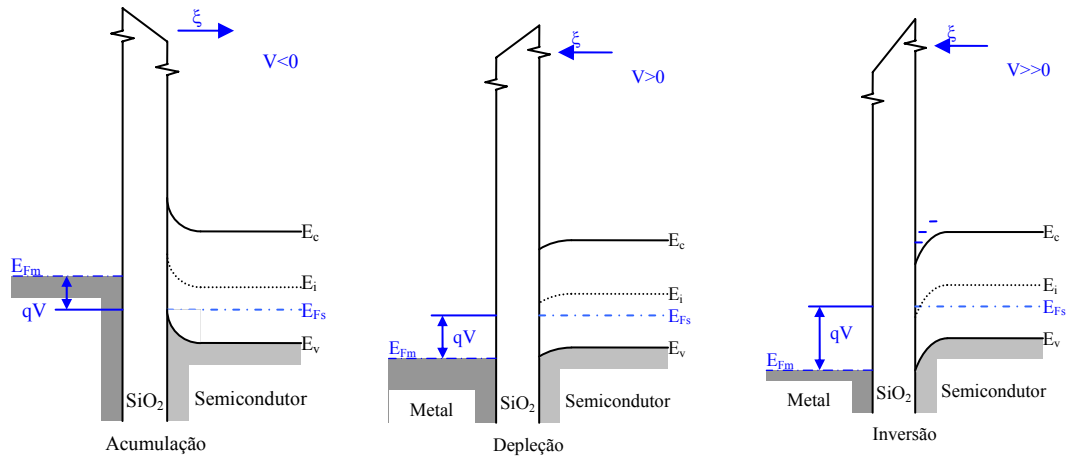


Figura n.º 10 – Diagrama de bandas para uma estrutura ideal de MIS em equilíbrio.

As bandas de energia de um sensor do tipo MIS alteram-se quando submetido a uma tensão,  $V$ , usualmente chamada de tensão de polarização,  $V_{bias}$ , conforme mostra a Figura n.º 11. Quando o valor da tensão é positivo mas de forma a que o nível de Fermi do semiconductor na junção ainda seja maior que o nível de Fermi do metal no equilíbrio, diz-se que o sensor está em Modo de Depleção. Contudo, se a tensão aumentar de tal forma que o nível de Fermi do semiconductor seja menor que o valor do nível de Fermi do metal no equilíbrio, diz-se que se o sensor está em Modo de Acumulação.

Quando a tensão de polarização é negativa, o sensor está igualmente em Modo de Acumulação. É neste modo que o diodo irá operar a maior parte do tempo, visto que diminui o tempo de resposta do sensor, pois a capacidade do sensor é inversamente proporcional à tensão de polarização.



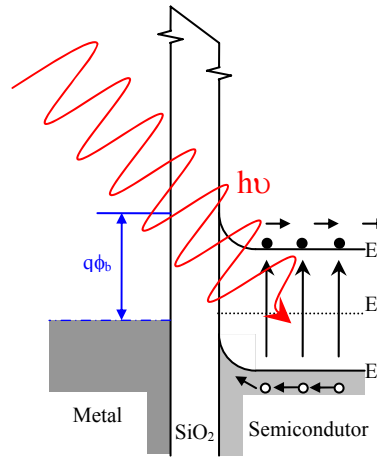
**Figura n.º 11 – Efeitos nas bandas da tensão aplicada;  $\xi$  representa o campo eléctrico resultante da aplicação da tensão de polarização, V**

A curva I-V característica dum dispositivo MIS depende da espessura do material isolador. Se a espessura for superior a cerca de  $50\text{\AA}$ , o dispositivo comporta-se como se fosse um condensador, pois a corrente que flui através do isolador tem um valor que pode ser desprezado. Se a espessura do isolador for de  $10\text{\AA}$  a  $50\text{\AA}$ , o dispositivo comporta-se como um diodo MIS de efeito de túnel. Por fim, se a espessura é inferior a  $10\text{\AA}$ , o isolador não oferece uma elevada resistência à corrente e o dispositivo comporta-se com se fosse um diodo Schottky (junção metal-semicondutor) [20]. No sensor utilizado, usa-se uma espessura de isolador entre os  $8\text{\AA}$  a  $15\text{\AA}$ . Desta forma, podemos afirmar que o sensor tem um comportamento similar ao de um diodo Schottky.

O metal utilizado para o dispositivo é o ouro, contudo este também é utilizado como camada resistiva. Devido a ser um bom condutor eléctrico a espessura da camada tem de ser fina para apresentar uma resistência moderada. A espessura da camada de ouro é de  $70\text{\AA}$ , sendo que com tal espessura reduzida pode-se afirmar que é transparente à radiação luminosa do laser ( $633\text{ nm} - 10^3\text{-}10^4\text{ cm}^{-1}$ ). Isso permite que o feixe luminoso incidente atravessasse a camada de ouro e seja absorvido pela camada i. Para uma largura da camada de  $2\text{ mm}$  e sabendo que o ouro possui uma resistividade de  $2,20\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , obtem-se um filme com uma resistência de  $15,7\text{ }\Omega/\text{cm}$ .

### 1.3.1 Díodo MIS sob Iluminação

A Figura n.º 12 mostra um diagrama de bandas de energia para um díodo MIS sob iluminação. Devido à espessura do isolador, os buracos atravessam-no sem grande oposição, isto é, os transportadores minoritários podem “tunelar” através do óxido. Assim, os buracos fotogerados fluem para o metal; contudo a corrente de saturação dos electrões emitidos termionicamente é substancialmente reduzida [20].



**Figura n.º 12 – Díodo MIS sob iluminação**

Como consequência, a fototensão ( $V_{ph}$ ) do díodo MIS vai ser dada pela seguinte expressão:

$$V_{ph} = \frac{n.k.T}{q} \left[ \ln \left( \frac{J_L}{R^* \cdot T^2} \right) + \frac{q\phi_B}{k.T} + \delta \sqrt{q \cdot \phi_T} \right] \quad (40)$$

sendo  $\delta$  a espessura do filme fino do isolador e  $q\Phi_b$  a barreira de energia entre o nível de Fermi do metal e a altura da banda de condução do semicondutor na zona da junção, em que:

$$R^* = 4\pi m_e q k^2 / h^3 \quad (41)$$

A expressão da corrente de saturação ( $I_s$ ) é a seguinte:

$$I_s = A \cdot R^* \cdot T^2 \cdot \exp \left( -\frac{q \cdot \phi_B}{T} \right) \cdot \exp \left( -\delta \sqrt{q \cdot \phi_T} \right) \quad (42)$$

onde  $q\phi_T$  representa a altura da barreira média apresentada pelo filme fino do isolador e  $T$  a temperatura.

### 1.3.2 Díodo MIS versus Díodo PN

O díodo MIS apresenta algumas diferenças em relação a um díodo de junção PN. O processo de emissão termiônica faz com que a densidade de corrente de saturação ( $J_s$ ), que no caso de díodos de silício cristalino (c-Si) de junção PN é tipicamente na ordem dos  $10^{-8}$  mA/cm<sup>2</sup> e  $10^{-6}$  mA/cm<sup>2</sup> para os díodos MIS de junção PN.

Visto haver uma diferença de magnitude de cerca de duas ordens de grandeza para os mesmos materiais, um díodo MIS terá uma tensão de funcionamento inferior à de um díodo de junção PN. Contudo, uma vez que a corrente de buracos, num díodo MIS, é apenas uma fracção muito pequena da corrente total, não existe praticamente armazenamento de portadores minoritários. Consequentemente, o tempo de armazenamento é desprezável e o tempo de resposta é apenas determinado pelo produto  $C.R_s$ , onde  $R_s$  é a resistência série e  $C$  a capacidade da região de depleção. O tempo de resposta de um díodo MIS polarizado inversamente pode chegar a ser na ordem dos  $10^{-11}$  s. Nos sensores de posição, em que a capacidade depende da área e a existência de um filme fino resistivo, o tempo de resposta não é assim tão rápido, mas continuam a ser mais rápidos que sensores de posição baseados em junção PN.

Toda a teoria apresentada até aqui diz respeito a modelos teóricos de funcionamento de junções metal-isolador-semicondutor, em que o semicondutor é um material cristalino, perfeitamente ordenado. Tal dispositivo obedece a leis da física do estado sólido e à física dos materiais semicondutores. Como exemplo, um díodo MIS, em que o semicondutor é c-Si encaixa-se perfeitamente na teoria acima descrita.

Ao contrário do c-Si, o silício amorfo (a-Si) apresenta uma estrutura desordenada, o que origina o aparecimento de caudas da banda e estados localizados, provocados pelos defeitos em volume e em superfície do a-Si:H. Este tipo de estrutura introduz complicações adicionais para a compreensão do funcionamento do díodo. Na secção seguinte será apresentada a teoria do a-Si:H e como este difere do c-Si.

### 1.3.3 Silício Amorfo

O silício cristalino, devido à ordem atómica, possui densidade de estados,  $N(E)$ , com fronteiras bem definidas resultando em bandas de condução e de valência separadas por um hiato energético, como se observa na Figura n.º 13(a) e (b), podendo, quer os electrões, quer os buracos movimentar-se à vontade nessas bandas. Contudo, no caso do silício amorfo, devido à desordem inerente, tal não acontece e na Figura n.º 13(c) mostra como a densidade de estados não é bem definida. Assim, a dispersão dos portadores aumenta e o livre percurso médio é bastante reduzido, na ordem das dimensões atómicas. Consequentemente, podemos dizer que o portador se encontra confinado ou localizado como se tivesse agarrado ao átomo. Como o livre percurso médio do portador depende da sua energia, define-se como sendo *energia crítica* aquela em que o livre percurso médio é da dimensão entre átomos vizinhos. Esta energia crítica é então a fronteira entre portadores localizados e não localizados [3].

Embora exista a possibilidade de condução através dos estados entre as energias críticas para a banda de condução e valência, verifica-se que esta é insignificante devido à baixa mobilidade dos portadores. Devido a este facto, na maioria das situações, dada a similaridade das características de corrente e tensão dos díodos de c-Si e a-Si:H, opta-se por utilizar a teoria do c-Si para o a-Si:H. Depois de descrito o funcionamento de um sensor de posição, será de seguida apresentado o método de fabrico do sensor de posição em substrato flexível.

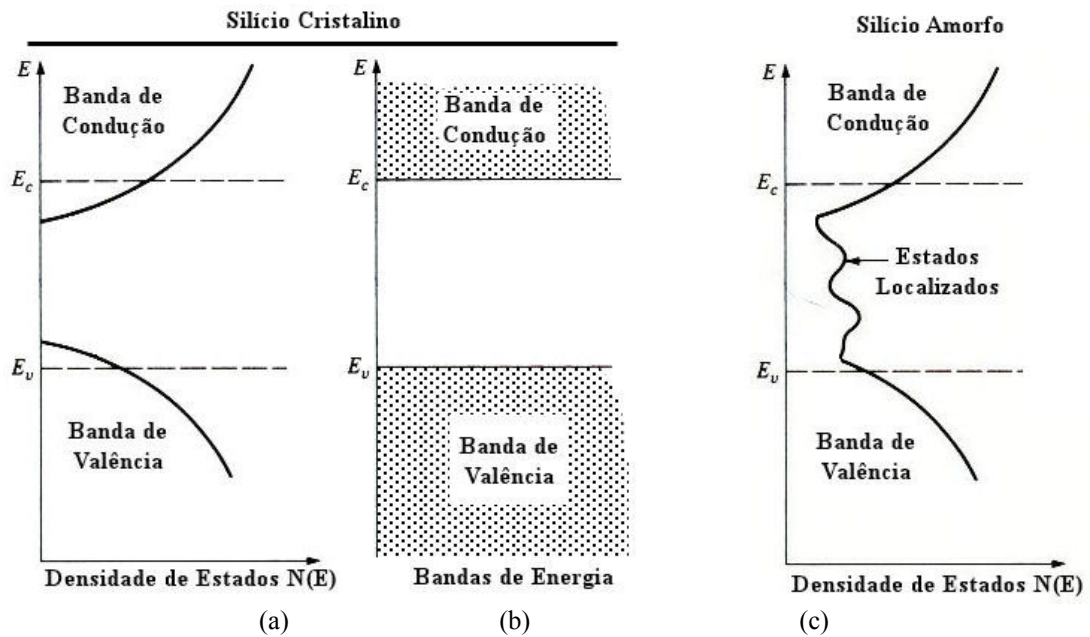


Figura n.º 13 – (a) Distribuição da densidade de estados para o silício cristalino e as suas (b) bandas de energia; (c) distribuição da densidade de estados para o silício amorfo sendo que devido aos estados localizados não existe bandas de energia definidas.  $E_c$  e  $E_v$  correspondem à *energia crítica* para as bandas de condução e valência.

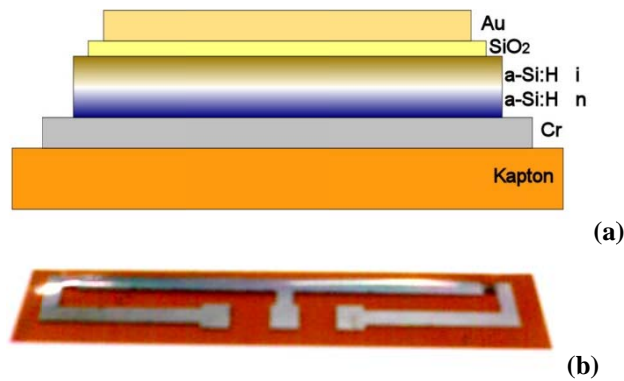
## 1.4 Fabrico dos Sensores de Posição

Nesta secção vamos abordar qual a estrutura utilizada do sensor de posição, o seu método de produção e as técnicas necessárias para o realizar. Como mencionado no início desta dissertação, este trabalho teve por base a tese de Doutoramento de Hugo Manuel Brito Águas que estudou a fundo os sensores de posição em substrato de vidro, pelo que, a ‘receita’ utilizada para os fabricar será aquela que deu melhores resultados, embora o substrato escolhido seja diferente por forma a obter-se flexibilidade.

### 1.4.1 Estrutura e Preparação dos Sensores

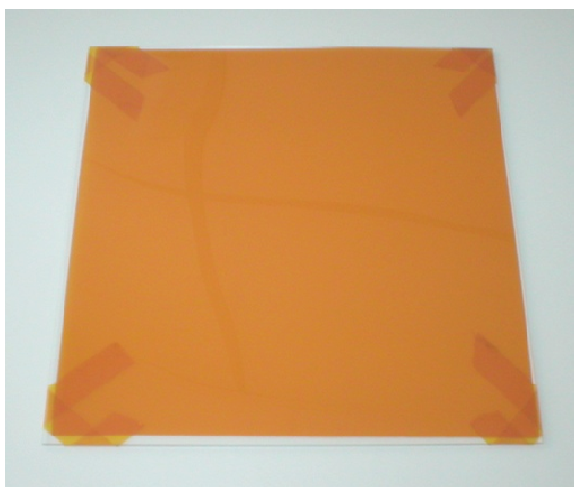
O sensor de posição pretendido possui a configuração MIS. Na Figura n.º 14 é apresentado o esquema das camadas utilizadas, sendo o substrato de Kapton® fabricado pela Dupont. O sensor possui a seguinte estrutura: Cr (3000Å) / a-Si:H [tipo n] (400Å) / a-Si:H [tipo i] (6000Å) / SiO<sub>x</sub> (15 Å) / Au (70Å) com o substrato de Kapton de 75µm. Esta é

a receita original. A troca do substrato de vidro pelo substrato de Kapton deve-se ao facto deste polímero suportar temperaturas elevadas, cerca de 400°C, podendo-se depositar o silício a cerca de 200°C sem o danificar.



**Figura n.º 14 – Sensor MIS 1: (a) estrutura utilizada, e (b) fotografia de um dos sensores produzidos.**

A limpeza do substrato inicia-se com a aplicação e lavagem com um produto de limpeza genérico, com o objectivo de eliminar possíveis vestígios de gordura. Após essa lavagem, o substrato passa por um banho em álcool isopropílico numa tina de ultra-sons durante aproximadamente 5 minutos. Quer antes, quer após a passarem por álcool, o substrato é sempre lavado com água ultra-pura. Depois da limpeza, o substrato é seco através de um jacto de azoto. De seguida, o substrato é fixado a uma placa de vidro 10x10 cm através de fita-cola de Kapton. O uso desta fita-cola deve-se ao facto, da mesma maneira que o substrato, poder suportar temperatura elevadas. Na Figura n.º 15 observa-se um substrato limpo e fixo.



**Figura n.º 15 – Substrato de Kapton, limpo e fixado a uma placa de vidro**



Os eléctrodos de crómio são produzidos por *lift-off* através de técnica de evaporação por canhão de electrões do crómio, utilizando a máscara da Figura n.º 17(a). O substrato é aquecido a 120°C para o material do eléctrodo ficar compacto e uniforme.

O silício amorfo é depositado por ‘*deposição química de vapores assistida por plasma*’ (PECVD - *plasma enhanced chemical vapor deposition*). Para a camada n, o substrato foi aquecido à 200°C e com um fluxo de 110 sccm da mistura de 30% de silano ( $\text{SiH}_4$ ) 1,8% de fosfina ( $\text{PH}_3$ ) e o restante de hidrogénio ( $\text{H}_2$ ) a uma pressão de 950 mTorr. A potência de RF foi de 40W durante 6 minutos. Para a camada i, o fluxo passou para 20 sccm da mistura de 30% de silano e o restante de hidrogénio para a mesma pressão. A potência utilizada agora foi de 45W durante 50 minutos. Concluído o depósito, é realizada a litografia do silício, com a máscara da Figura n.º 17(b), por erosão seca (dry etching).

Para produzir o óxido utilizamou-se a oxidação térmica, em que o substrato é colocado numa estufa a 180°C durante 3h. Este processo cria um óxido nativo com cerca de 1,5 nm. Como somente o silício oxida, não há necessidade de utilizar qualquer outro processo litográfico.

Por fim, a camada resistiva é conseguida depositando um filme fino de ouro sobre o substrato. Usa-se a técnica de *lift-off* e a técnica de evaporação por canhão de electrões do crómio, utilizando a máscara da Figura n.º 17(c). O processo completo de fabrico encontra-se sintetizado na Tabela n.º 1.

Tabela n.º 1 – Síntese do processo de fabrico de um sensor de posição flexível

<b>Etapa</b>	<b>Processo</b>	<b>Descrição</b>
<b>1</b>	Limpeza do Substrato	A limpeza inicia-se com uma limpeza com um detergente anti-gordura. Segue-se um banho em álcool isopropílico na tina de ultra-sons durante 5 minutos. Lavagem final com água ultra-pura.
<b>2</b>	Criação da máscara	Cria-se uma camada uniforme de fotoresiste pelo uso do spinner com uma velocidade de 2400 RPM. Seca-se durante 10 minutos a 60°. Imprime-se a máscaras (Fig.17a) com recursos a UV e revela-se.
<b>3</b>	Depósito dos Eléctrodos	Através de evaporação térmica assistida por canhão de electrões, deposita-se uma camada de crómio com cerca de 200 nm.
<b>4</b>	Remoção da Máscaras	Retira-se o substrato do suporte de vidro e num recipiente com acetona, remove-se todo o fotoresiste. Láva-se em álcool isopropílico e retiram-se todos os resíduos em água ultra-pura
<b>5</b>	Depósito do Silício	Inicia-se com a camada tipo ‘n+’ e de seguida a camada tipo ‘i’
<b>6</b>	Criação da máscara	Idêntico à etapa 2 mas com a máscara da Fig.17b
<b>7</b>	Dry etching	Utiliza-se o procedimento recomendado
<b>8</b>	Remoção da Máscaras	Repete-se a etapa 4
<b>9</b>	Criação do Oxido	Numa atmosfera com presença de oxigénio, aquece-se o sensor à temperatura de 180°C durante 2 horas.
<b>10</b>	Criação da máscara	Idêntico à etapa 2 mas com a máscara da Fig.17c
<b>11</b>	Depósito do Ouro	Evaporação térmica assistida por canhão de electrões de ouro com uma camada de crómio com cerca de 7 nm.
<b>12</b>	Remoção da Máscaras	Repete-se a etapa 4

### 1.4.2 Técnicas Utilizadas no Fabrico dos Sensores

Para fabricar o sensor, existem várias técnicas que se podem utilizar. No trabalho efectuado para a sua tese de Doutoramento, o Doutor Hugo Manuel Brito Águas construiu os sensores utilizando os seguintes métodos: Litografia, a Técnica de Evaporação por Canhão de Electrões, Deposição Química de Vapores Assistida por Plasma (PECVD - Plasma e a Erosão Seca. Para a produção do óxido efectuou um estudo com as seguintes técnicas: Oxidação térmica, Oxidação Anódica, Oxidação por  $H_2O_2$ , Deposição de Oxidação por Canhão de electrões e Deposição de Oxidação por HMDSO. As quatro técnicas distintas e complementares irão ser descritas de seguida.

#### 1.4.2.1 Fotolitografia

A fotolitografia é um processo pelo qual é feita a transferência de um padrão para a superfície do material. Para a sua realização derrama-se no substrato, já com filme depositado ou não, uma pequena quantidade de *fotoresiste*, sendo depois o substrato colocado em rotação de modo a obter-se uma película fina de *fotoresiste*, dependendo a sua espessura da velocidade de rotação. Esta película quando exposta a radiação ultravioleta é sensibilizada e após revelada, deixa no substrato um padrão idêntico ao da máscara utilizada. Todo o processo encontra-se esquematizado na Figura n.º 16.

O *fotoresiste* é uma substância orgânica de baixo peso molecular, que polimeriza quando sujeita a radiação ultravioleta. É aplicado no estado líquido sobre um substrato, que é seguidamente posto em alta rotação para permitir um espalhamento uniforme e de baixa espessura do *fotoresiste*. Sobre o conjunto é colocada uma máscara com o padrão que se pretende conferir ao *fotoresiste* e ao substrato. Depois de bem alinhada, a máscara deixa passar radiação ultravioleta para o *fotoresiste* segundo o seu padrão. Seguidamente é feita a revelação do *fotoresiste*, ficando diferenciadas as zonas que foram expostas à radiação ultravioleta das zonas que estavam protegidas pela máscara.

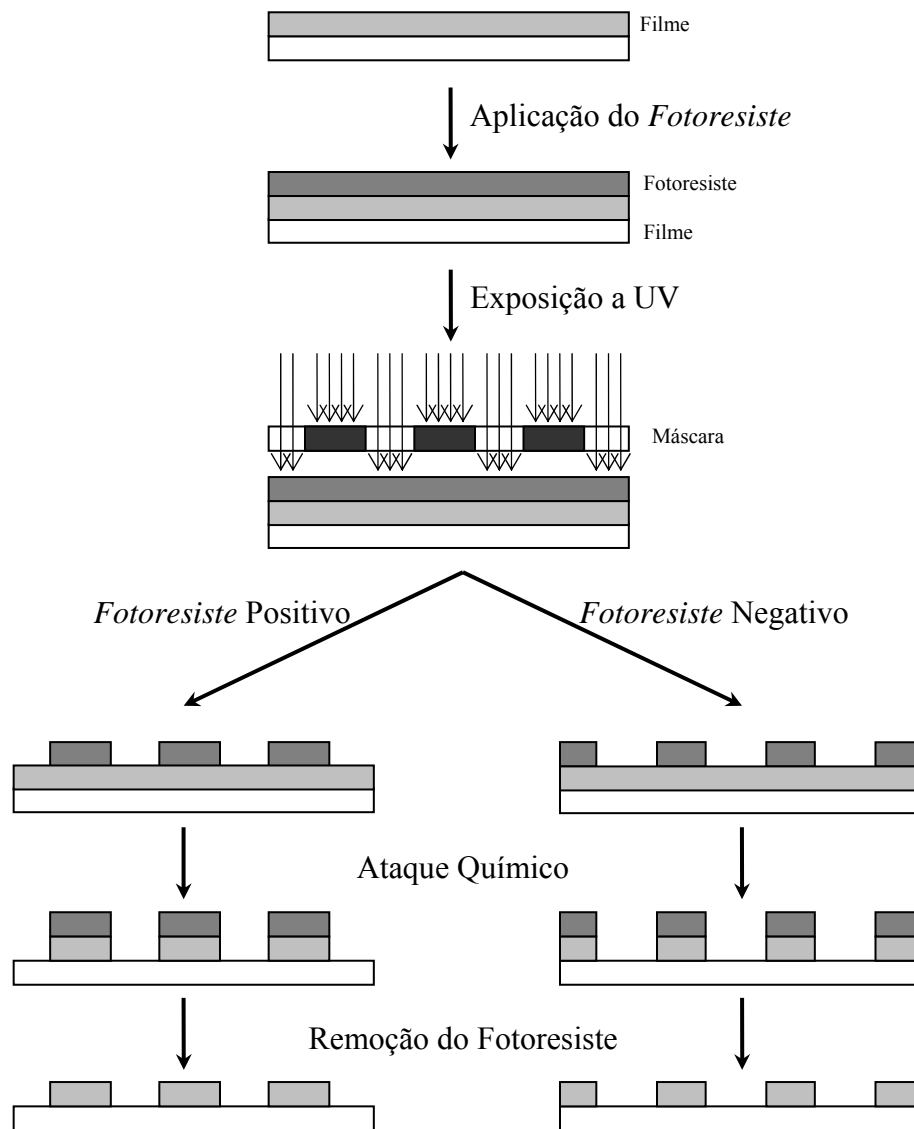


Figura n.º 16 – Esquema exemplificativo de um processo de fotolitografia

Se o *fotoreziste* for positivo, quando é exposto à radiação ultravioleta dá-se a quebra de ligações, originando um polímero com menor peso molecular e mais solúvel. Neste caso, a solução reveladora vai remover o *fotoreziste* impressionado, deixando a descoberto a zona que se pretende remover.

O *fotoreziste* negativo, quando é exposto à radiação ultravioleta, dá-se a criação de ligações cruzadas, formando um polímero com maior peso molecular e menos solúvel. A solução reveladora vai retirar apenas o *fotoreziste* que não foi impressionado, abrindo pequenas janelas no substrato.

A erosão selectiva vai então remover todo o material que ficou descoberto, ou seja, aquele que não ficou protegido pelo *fotoreviste* remanescente. O processo de erosão pode ser conseguido via húmida – *wet etching*, utilizando soluções químicas, ou por via seca – *dry etching*, utilizando técnicas de plasma; sendo esta posteriormente descrita. A escolha do tipo de erosão e do químico ou gás utilizado para o processo vai depender do material que se pretende remover, e tendo em conta que é necessária uma grande selectividade para que o agente erosivo remova rapidamente a camada pretendida, sem atacar a zona protegida pelo restante *fotoreviste*. De seguida, é removido quimicamente todo o *fotoreviste* ficando na superfície o padrão desejado.

Existe ainda outro processo de transferência do padrão para o filme, designado por *lift-off*. Contrariamente ao processo anterior, em que, em primeiro lugar é colocado o material, imprimido o padrão e removido o material não protegido, no *lift-off*, primeiro é colocado na superfície o *fotoreviste* e revelado. As janelas abertas no *fotoreviste* podem servir para se fazerem deposições selectivas, isto é, deposita-se o material e o que fica depositado nas janelas é o material que irá permanecer. Quanto ao material depositado sobre o *fotoreviste*, este é removido quando se ataca quimicamente o *fotoreviste*. Assim a camada de *fotoreviste* perde a adesão ao substrato e é removida, juntamente com o material que se encontrava depositado sobre ele.

Para o fabrico dos sensores foram utilizadas três máscaras e um *fotoreviste* positivo. Na Figura n.º 17 encontram-se os desenhos delas. Em (a) tem-se a máscara que é utilizada para os eléctrodos, através de *lift off*. A máscara (b) serve para proteger a camada activa, o silício, quando o substrato vai ao *dry etching*. Por fim, em (c) é para a realização da camada resistiva através de *lift off*.

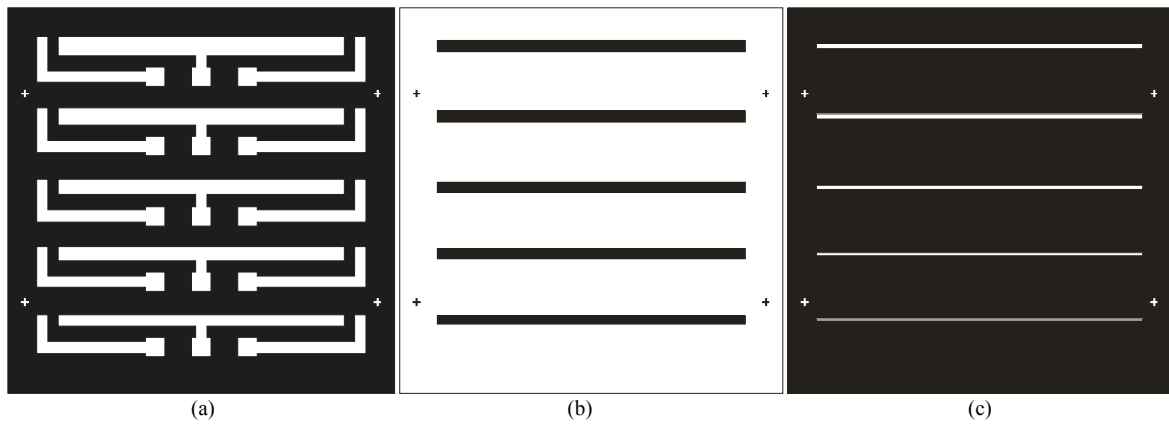


Figura n.º 17 – Máscaras utilizadas no fabrico dos sensores de posição

#### 1.4.2.2 Evaporação Térmica assistida por Canhão de Electrões

No processo de evaporação térmica assistida por canhão de electrões, um feixe de electrões com elevada energia cinética, é produzido no canhão. Esta energia é transformada em energia térmica, quando o feixe, embate na superfície do material existente no cadinho, fundindo-o e evaporando o material.

Este feixe de electrões é gerado a partir de um filamento incandescente, que se encontra colocado numa ranhura, existente no cátodo, o qual está ligado ao terminal negativo de uma fonte de alta tensão. Quando o filamento é sujeito a um elevado campo eléctrico, os electrões são extraídos e depois acelerados pelo campo eléctrico. Por acção de duas bobinas magnéticas, o feixe é depois deflectido 270° e focado na superfície do material a ser evaporado, tal como esquematizado na Figura n.º 18.

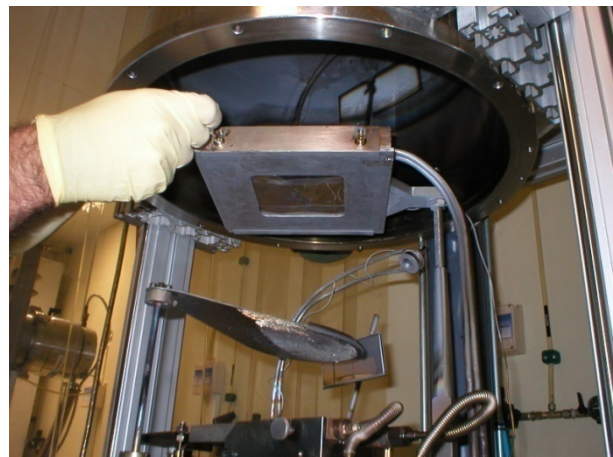
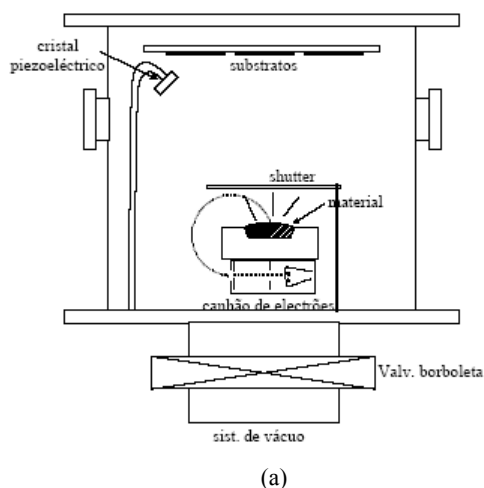


Figura n.º 18 – Sistema de evaporação por canhão de electrões: (a) Representação esquemática do sistema e (b) fotografia do sistema.

A corrente no filamento tanto pode ser corrente alternada (**AC**) ou em corrente contínua (**DC**). A corrente **DC** produz um feixe mais estável e preciso e é usada geralmente em canhões de electrões de elevada potência. A emissão termoiónica dos electrões a partir do filamento é descrita pela equação de Richardson:

$$J = A.T^2 \cdot \exp\left(\frac{-q\phi}{k.T}\right) \quad (43)$$

em que: J representa a densidade de corrente emitida pelo filamento,

A a constante de Richardson,

T a temperatura do filamento em Kelvins,

q a carga do electrão,

$\phi$  a função trabalho do material de que é constituído o filamento,

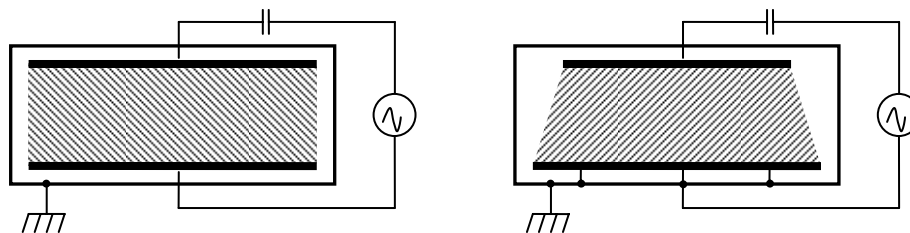
K a constante de Boltzman.

Esta técnica não apresenta qualquer contaminação por parte do cadinho, pois como este é refrigerado, o material que fica fora do alcance do feixe não é fundido.

### 1.4.2.3 Deposição Química de Vapores Assistida por Plasma

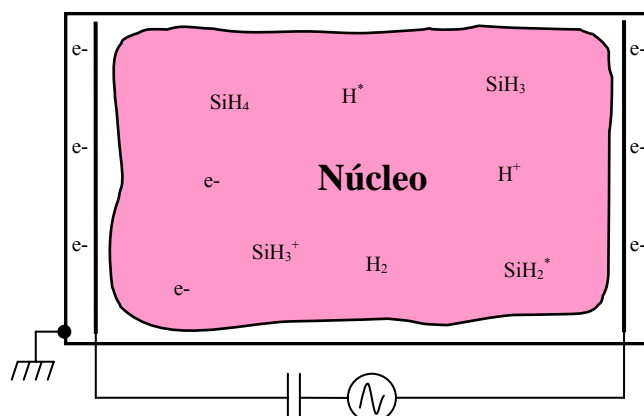
Na técnica de Deposição Química de Vapores Assistida por Plasma, também conhecida por PECVD (*plasma enhanced chemical vapor deposition*), o plasma é utilizado para estimular as reacções de uma ou mais espécies da fase gasosa, na superfície de um substrato. O plasma ajuda a quebrar as ligações das moléculas através de um processo de dissociação, criando espécies activas que vão reagir na superfície do substrato conseguindo-se assim fazer crescer películas finas.

O reactor utilizado na técnica PECVD tem uma configuração planar, com dois eléctrodos, do tipo díodo, onde o primeiro é ligado ao gerador e o outro ligado à massa (paredes do reactor). Um sistema deste tipo, pode ser distinguido em função da área dos seus eléctrodos, podendo ter uma configuração do tipo simétrico, se ambos os eléctrodos tiverem a mesma área, ou do tipo assimétrico, se as suas áreas forem diferentes. Estes dois tipos de configuração estão representados na Figura n.º 19.



**Figura n.º 19 – Sistema de plasma por r.f. (Simétrico e Assimétrico, respectivamente).**

A energia necessária para quebrar as ligações de moléculas ou excitar átomos ou espécies moleculares, está compreendida entre 0,1 e 20 eV. A distribuição das energias dos electrões situa-se nesta gama, não sendo de estranhar a elevada actividade existente tanto no interior do plasma como nas superfícies em contacto com ele. Um exemplo de plasma de silano é mostrado na Figura n.º 20.



**Figura n.º 20 – Plasma de silano, gerado entre dois eléctrodos de r.f., idêntico à configuração de plasma utilizado na técnica PECVD.**

O resultado desta actividade química origina a formação de depósitos oligómeros nas superfícies em contacto com o plasma (PECVD), ou a erosão reactiva dessas superfícies, função da actividade químicas das espécies presentes. Na realidade, a deposição e a erosão, são fenómenos muito similares, diferindo principalmente na pressão de vapor e no produto das reacções, tendo em conta o tipo e a actividade reactiva dos átomos das espécies presentes no plasma.



Podemos então dizer, que o processo de crescimento de filmes por decomposição química de vapores assistida por plasma (PECVD), envolve um vasto conjunto de etapas. Na primeira etapa, o impacto do electrão com a molécula de gás, conduz à sua dissociação directamente ou após alguns processos de colisão das moléculas excitadas. Os oligómeros e monómeros formados, vão-se acamar sobre a superfície do substrato onde coalescem, através do ganho de energia suficiente à formação de ligações estáveis com as primeiras monocamadas do substrato. Na superfície ocorrem reacções espontâneas e rearranjos morfológicos. Existem assim, transformações que conduzem à formação de filmes com estrutura e morfologia diversas das dos oligómeros ou monómeros de partida, onde ocorrem fases metaestáveis, impossíveis de ocorrer em processos puramente químicos.

#### **1.4.2.4 Erosão Húmida**

O método mais simples de erosão envolve a dissolução do material num solvente líquido, sem que ocorra alterações na natureza química das espécies dissolvidas.

A erosão húmida utiliza um líquido solvente para remover o material que não está protegido pelo fotoresiste. Para tal o material tem de ser solúvel na solução de ataque ou, pelo menos, que possa ser transportado para fora da superfície, por esta.

Dos vários tipos de reacções químicas envolvidos num processo de ataque, as mais comuns são as reacções de oxidação-redução. Estas reacções envolvem a conversão do material a ser removido num estado de oxidação mais elevado.



O maior problema associado à erosão húmida, principalmente quando se pretendem resoluções muito elevadas, é o facto de este ser um processo isotrópico, pois o líquido vai erodir o material uniformemente em todas as direcções. A Figura n.º 21 mostra o resultado de uma erosão isotrópica, em que o processo de erosão se dá também por baixo do fotoresiste até

uma distância igual à espessura do filme, comparativamente a uma erosão anisotrópica, própria da erosão seca [21], conforme veremos seguidamente.

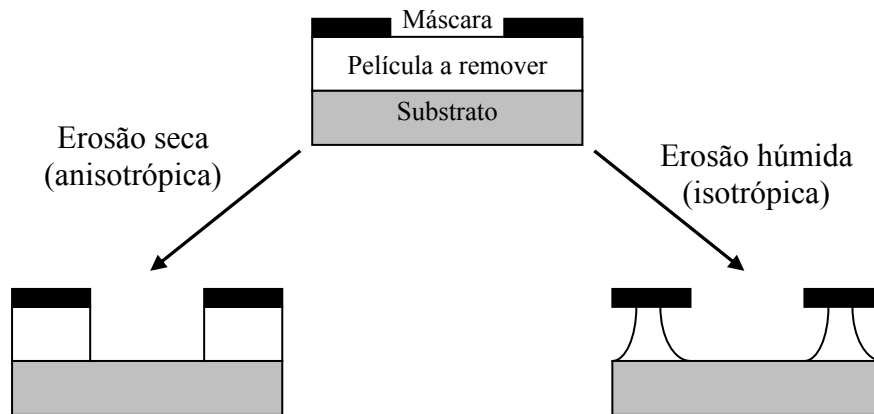


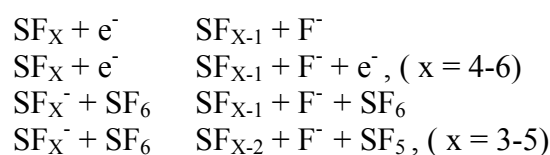
Figura n.º 21 – Erosão isotrópica e anisotrópica

### 1.4.2.5 Erosão Seca

A erosão seca (Plasma Dry Etching) é uma tecnologia cujo objectivo é o de remover material de uma superfície através de um processo de erosão, sendo uma tecnologia muito utilizada no fabrico de circuito integrados pois permite uma elevada anisotropia no ataque à superfície.

A erosão seca é conseguida colocando o substrato num sistema de vácuo, onde é criado um plasma recorrendo a uma tensão de radiofrequência. As espécies reactivas que são originadas a partir da decomposição do gás do plasma vão reagir quimicamente com o material a ser retirado.

A utilização do gás  $\text{SF}_6$ , preferencialmente a outros, deve-se às suas características: é inócuo para a saúde e não tem as implicações a nível ambiental, como por exemplo o gás  $\text{CF}_4$ , propulsor das reacções de destruição da camada de ozono. Através de sucessivas colisões entre os electrões e moléculas, contidas no gás, originam-se as partículas reactivas – radicais de flúor:



Os radicais livres têm elevada aderência ao substrato, reagem quimicamente com o material a remover, formando compostos voláteis. Após esta reacção dá-se a desadsorção dos produtos de reacção e o transporte dos compostos voláteis para longe da superfície do substrato, sendo posteriormente removidos através do sistema de bombeamento da câmara [22].

A erosão seca é um processo anisotrópico, como já se observou na figura anterior, e por isso é vantajoso relativamente à erosão húmida. A selectividade deste processo é, no entanto, bastante inferior [23].

Finalmente, depois de efectuada a remoção selectiva, é necessário retirar o *fotoreviste* protector. Para tal utiliza-se acetona, que faz com que o *fotoreviste* perca a adesão ao substrato, sem atacar este último.

## **1.5 Resultados da produção**

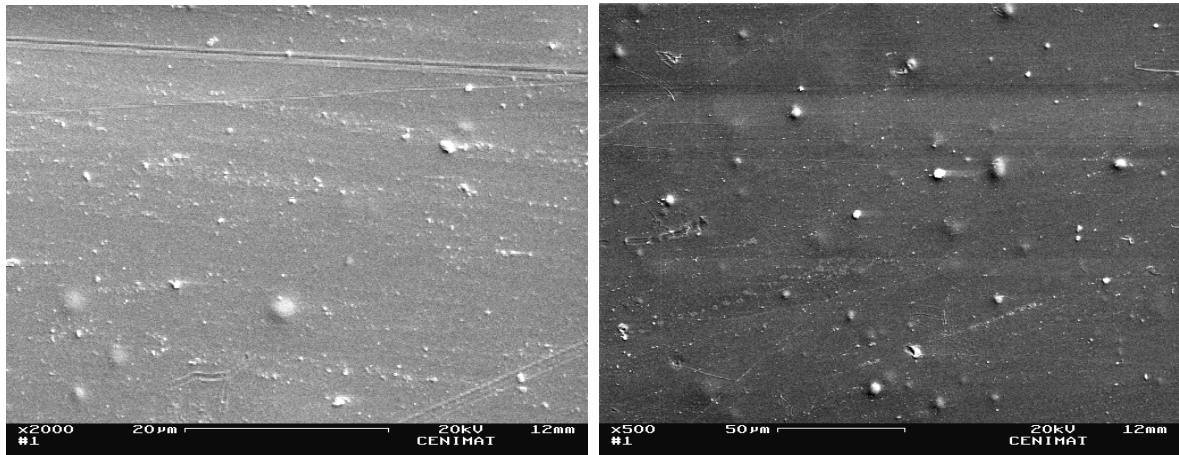
De seguida serão mostrados os resultados obtidos do fabrico dos sensores. Inicia-se com a inesperada adesão do substrato de Kapton ao vidro e como se tentou evitá-lo realizando o depósito de Kapton (poliamidas) directamente sobre o vidro. De seguida, a escolha da espessura mais adequada para a produção dos sensores. Mostraremos também as facturas existentes nos eléctrodos de crómio e a alteração da composição química dos eléctrodos de forma a ultrapassar as fracturas e posteriormente a falta de adesão do silício ao alumínio, material dos novos eléctrodos. No fim será mostrado como a mudança de reator teve importância na produção de sensores.

### **1.5.1 Adesão do substrato ao vidro**

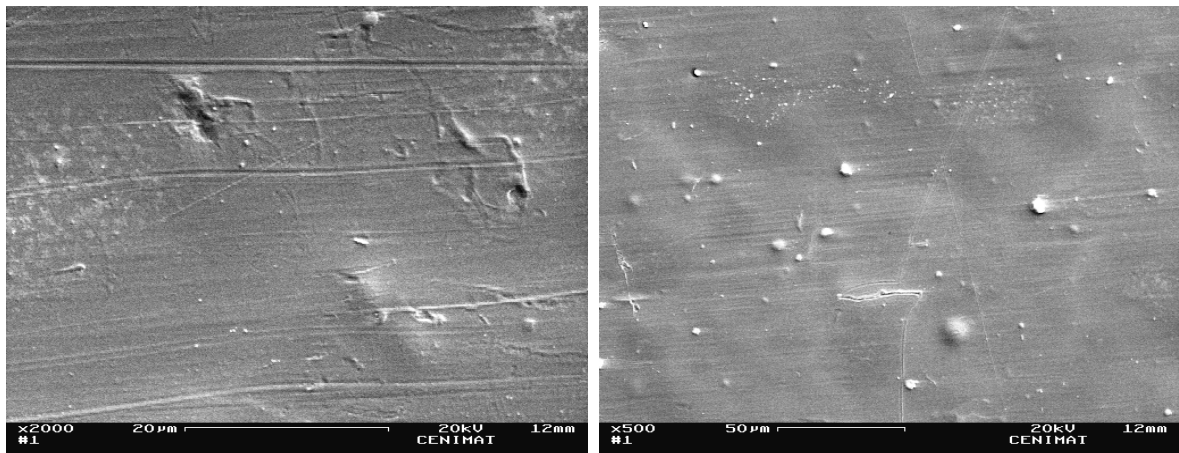
Optou-se por fixar o substrato de Kapton numa placa de vidro de 10 x 10 cm, (visto que estas são utilizadas no sistema onde foi realizado o trabalho da tese de Doutoramento que serve de apoio a este trabalho), através do uso de fita-cola de Kapton, conforme mostra a Figura n.º 15. Este processo revelou-se bastante eficiente; contudo, durante a fase de fabrico

dos sensores verificou-se que existiam ocasiões em que o substrato de Kapton ficava colado à placa de vidro, inviabilizando o seu uso pois os sensores ficavam danificados ao se tentar remover o substrato do vidro.

Realizou-se Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM) para tentar descobrir a causa do problema. Nas Figura n.º 22 e Figura n.º 23 é visualizado o aspecto das faces posterior e anterior do substrato de Kapton.



**Figura n.º 22 – Imagens de SEM da face posterior**



**Figura n.º 23 – Imagens de SEM da face anterior**

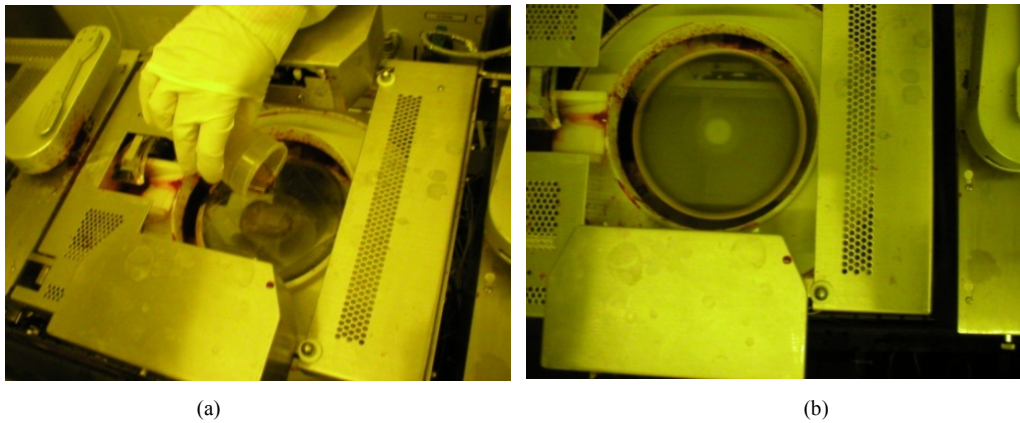
Por observação visual directa, verificou-se que as duas faces não eram iguais, embora seja de difícil reconhecimento. Assim, escolheu-se a face posterior, correspondente à Figura n.º 22 para ser a face onde o sensor seria construído, pois esta apresenta uma superfície mais uniforme. Na face anterior (Figura n.º 23), observa-se um relevo de ‘baixa frequência’, defeitos de dimensão superiores a qualquer outro na superfície e muitos riscos.

A razão para a adesão do substrato ao vidro não foi apurado, pelo menos através da análise das imagens e pelas experiências efectuadas. O assunto foi discutido entre várias pessoas ligadas aos sensores e o consenso geral foi o de assumir que os reagentes utilizados, principalmente a acetona utilizada no “lift-off” do crómio, que ficava entre o Kapton e o vidro, causavam o problema. Isto porque não se conseguia remover completamente a acetona e os seus resíduos, quando da deposição do silício a 200°C. A maneira encontrada para minimizar o efeito é realizar uma limpeza dos reagentes através de água ultra-pura e a subsequente secagem do substrato.

Antes do Kapton sofrer o processo de polimerização, a sua constituição é de poliamida. Quando as poliamidas são depositadas numa superfície de vidro e posteriormente curadas, o substrato de Kapton assim produzido impede que reagentes penetrem na interface e sem que a adesão dos dois materiais seja forte, facilitando a sua remoção do vidro. Este assunto será abordado de seguida.

### **1.5.2 Depósito de Poliamidas sobre o Vidro**

Como o substrato de Kapton estava a colar ao suporte de vidro, tentou-se arranjar alternativa para resolver o problema. No ‘Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores’ realizaram-se alguns depósitos de poliamidas em vidro. O objectivo da realização destes depósitos é de evitar que os reagentes entrem na interface do substrato e o vidro. Na Figura n.º 24 encontra-se duas fotografias do processo de depósito da película de poliamidas sobre o vidro. As poliamidas, depois do processo de cura, transformam-se em Kapton. No entanto, os filmes de Kapton produzidos por este processo eram demasiado finos ( $\approx 2\mu\text{m}$ ) e como consequência, demasiado frágeis. Assim constatou-se que este processo não era compatível com as características desejadas para os sensores de posição.

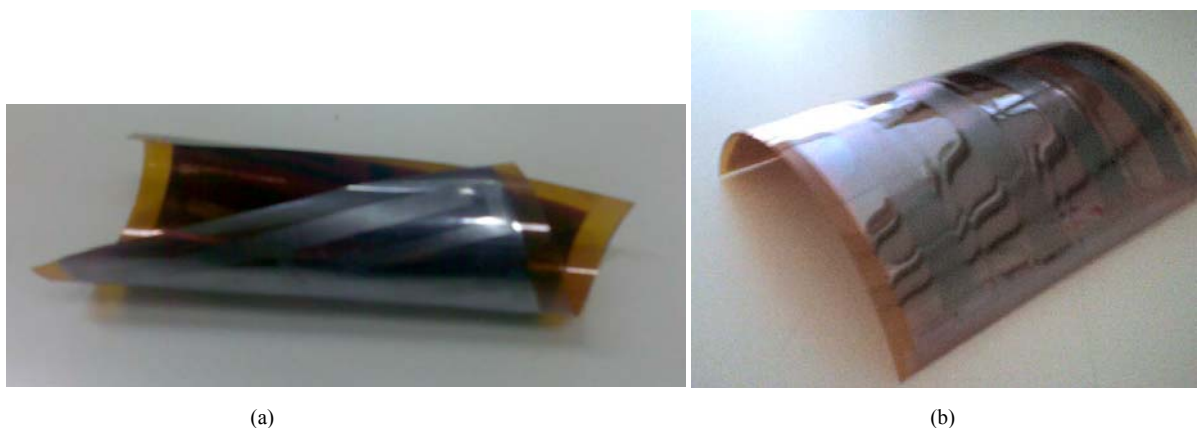


**Figura n.º 24 – (a) Depósito da poliamida, e (b) Spin do substrato com o depósito da poliamida**

### 1.5.3 Escolha da Espessura do Substrato

Embora o substrato seja flexível, é pretendido que o mesmo continue plano após todos os processos necessários para o seu fabrico e, somente, depois aplicá-lo a superfícies não planas. O processo mais crítico é o depósito de silício a cerca de 200°C, e é o filme de silício que introduz tensões ao sensor, assim é importante otimizar a espessura para que os efeitos das tensões sejam mais atenuados.

Experimentaram-se várias espessuras para o substrato (25, 50, 75 e 125µm) e nestas, as que apresentaram menores efeitos da tensão foram as espessuras de 75µm e 125µm. Após este resultado, todos os sensores construídos foram realizados com a espessura de 75µm, visto ser a menor. Na Figura n.º 25 temos duas fotografias onde observamos dois substratos, com (a) 50 µm e (b) 75 µm, com depósitos de silício; observa-se que o efeito das tensões é menor no substrato de 75 µm.



**Figura n.º 25 – Substratos de (a) 50µm e (b) 75µm; ambos os substratos com processos iguais**

#### 1.5.4 Eléctrodos

A função de um eléctrodo, em microelectrónica, é realizar um contacto eléctrico eficiente entre dois meios. No caso particular de um PSD, pretende-se conseguir interligar as camadas do sensor com o ‘mundo exterior’, i.e., à electrónica que permite obter a posição do feixe luminoso incidente.

Verificou-se, após o fabrico, que os sensores não funcionavam correctamente. Para determinar a razão, descartando a hipótese de tratar-se de uma falha no processo de fabrico por terem sido produzidos vários, realizaram-se diferentes testes. Estes envolveram a determinação de curto-circuitos, circuitos abertos, tensão em circuito aberto e medição da resistência intereléctrodos. Neste último teste, com o multímetro para medir resistividade verificou-se que os eléctrodos possuíam uma resistência elevada, dando mesmo em alguns casos a indicação de infinito, o que não é característico de um eléctrodo. Este facto indicou a razão para os sensores não trabalharem: os eléctrodos não estavam a ser bons condutores.

Tornou-se assim necessário determinar a razão pela qual o eléctrodo não conduzia, o que só ficou claro quando foi realizado SEM do eléctrodo. Na Figura n.º 26 encontram-se duas imagens de SEM do eléctrodo de crómio e da zona de interface crómio e silício, e como se pode observar, o filme fino de crómio está fracturado, com fissuras na ordem dos 500 nm. Assim, concluiu-se que o eléctrodo de crómio não conduzia por não existir um caminho eléctrico para os sinais percorrerem desde a zona activa do sensor até ao ponto de contacto com os fios eléctricos.

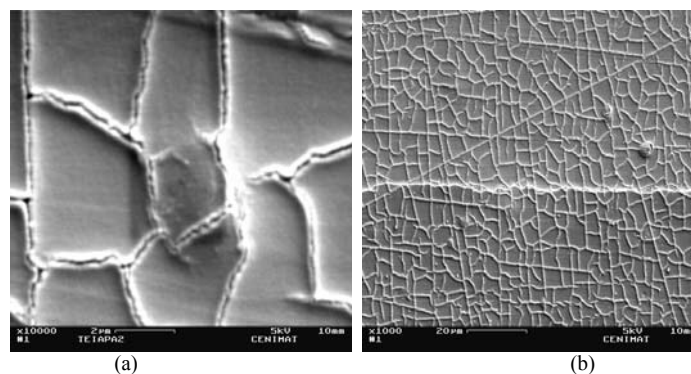
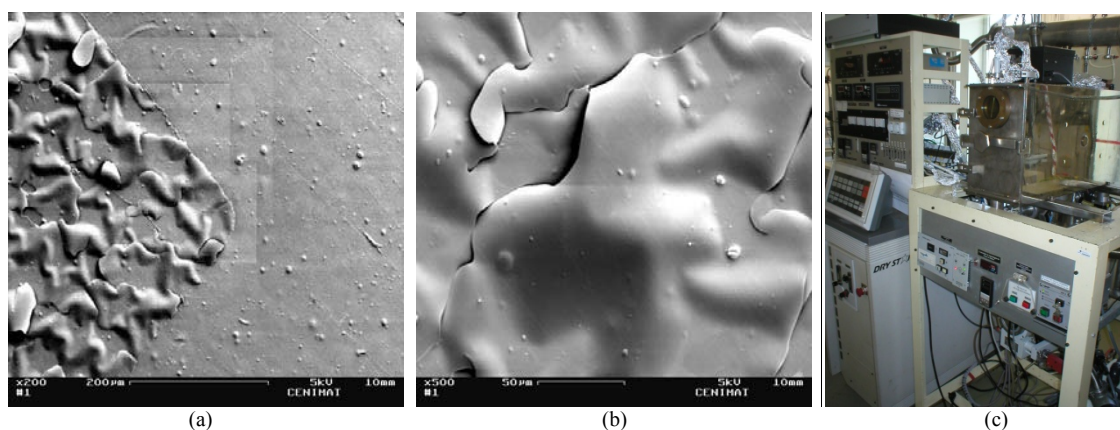


Figura n.º 26 – Imagens de SEM de um PSD na zona do (a) eléctrodo do crómio e (b) da interface de crómio e silício

Verificou-se que o fenómeno de fractura do crómio acontece na altura em que é depositado, pois foram analisadas amostras em que somente existia o depósito de crómio, sem qualquer processo litográfico e estas também apresentavam o mesmo fenómeno.

Para a obtenção de eléctrodos condutores foi necessário realizar modificações à composição do eléctrodo do sensor. Assim, resolveu-se experimentar alterar a composição do eléctrodo, de crómio para alumínio, ficando a receita da seguinte forma Al/a-Si:H[n]/a-Si:H[i]/SiO<sub>x</sub>/Au. O alumínio foi escolhido por ser amplamente utilizado como contacto eléctrico em microelectrónica; contudo os resultados foram surpreendentes. O alumínio tem boa adesão ao Kapton e os eléctrodos são de excelente qualidade; no entanto, após o depósito de silício sobre o alumínio este não aderiria ao substrato. Na Figura n.º 27 são apresentadas imagens de SEM do depósito de Silício sobre Alumínio.

Em face deste resultado, experimentou-se realizar o eléctrodo composto por alumínio e crómio, sendo o silício depositado após o crómio; contudo o silício continuava a não aderir ao substrato. Apesar dos resultados, podemos concluir que a falta de aderência do silício ao eléctrodo, contendo alumínio, não se deve por dilatações térmicas visto que o depósito de silício não salta sobre o Kapton. A causa mais provável é acontecerem contaminações e por isso foi decidido realizar o depósito de silício sobre o alumínio no ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’, do ‘Departamento de Física’ da ‘Universidade do Minho’ onde com sucesso depositam silício sobre alumínio.

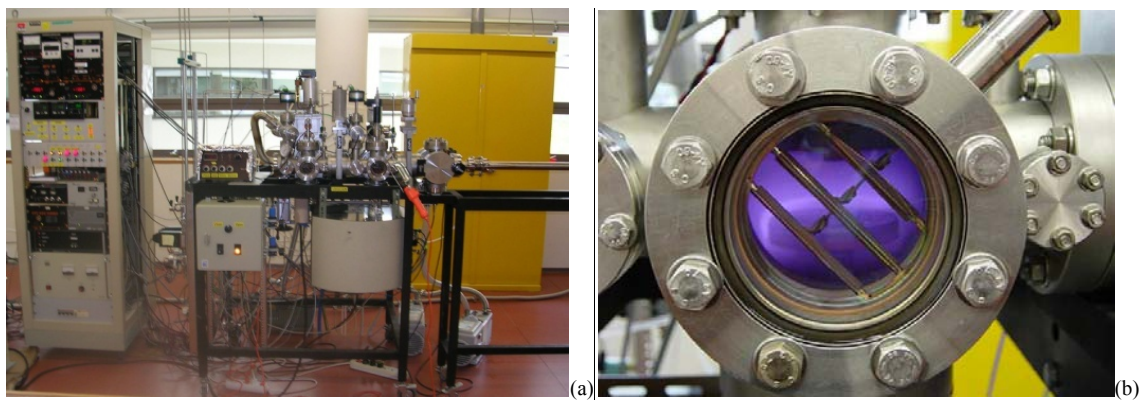


**Figura n.º 27 – Imagens de SEM do depósito de Silício sobre Alumínio, (a) zona de interface, Kapton e o eléctrodo e (b) ampliação do depósito de silício. (c) Sistema de deposição do Silício no Dep. Materiais.**



### 1.5.5 Depósito de Silício no ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’

O ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’, do ‘Departamento de Física’ da ‘Universidade do Minho’ está a desenvolver células solares em substrato flexível, Kapton e para tal, depositam silício sobre alumínio. A fotografia do sistema é observada na Figura n.º 28. Como o sistema só permite substratos de 3,5 x 3,5 cm foi preciso criar novas máscaras, porque as existentes são para um sistema em que os substratos têm o tamanho de 10 x 10 cm. Optou-se por criar máscaras mecânicas, em que os modelos estão na Figura n.º 29, em vez da tradicional fotolitografia pois assim evita-se a contaminação, se for este o problema.



**Figura n.º 28 – Fotografia do (a) sistema de deposição do ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’, do ‘Departamento de Física’ da ‘Universidade do Minho’ e (b) da câmara de deposição**



**Figura n.º 29 – Máscaras utilizadas no fabrico dos sensores de posição para o sistema do ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’**

Foram preparadas três amostras em que o material do eléctrodo é o alumínio. Como nunca tinha sido realizado nenhum sensor do tipo MIS no ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’ não se sabia qual a melhor receita para produzir os sensores e por esta razão

optou-se por fazer os depósitos de silício de três maneiras. Na Tabela n.º 2 encontram-se os parâmetros de depósito do silício.

**Tabela n.º 2 – Condições dos três depósitos de a-Si:H realizados no ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’**

		H <sub>2</sub> [%]	PH <sub>3</sub> [%]	SiH <sub>4</sub> [%]	P <sub>i</sub> [mbar]	P <sub>d</sub> [mTorr]	J (P) [mW/cm <sup>2</sup> ]	t [min]	T [°]	e [nm]	Obs.
SG1	n	98.5	0,04	2,46	2,6x10 <sup>-7</sup>	1500	178 (5W)	16	150	149,6	Low Pressure Low Power Low Si grow
	i	96	0	4	1,7x10 <sup>-7</sup>	140	178 (5W)	62	150		
SG2	n	98.5	0,04	2,46	1,3x10 <sup>-7</sup>	1500	178 (5W)	16	150	141,3	High Pressure High Power High Si grow
	i	96	0	4	1,2x10 <sup>-7</sup>	1500	356 (10W)	33	150		
SG3	n	98.5	0,04	2,46	5,0x10 <sup>-7</sup>	1500	178 (5W)	16	150	185,5	Low Pressure Low Power High Si grow
	i	0	0	100	2,3x10 <sup>-7</sup>	140	178 (5W)	10	220		

Houve uma boa adesão do depósito de silício sobre o alumínio em qualquer das amostras; contudo, após os sensores terminados, não houve sinal proveniente dos sensores. Com as novas máscaras disponíveis, de 3,5 x 3,5 cm, decidiu-se então mudar do sistema de deposição do silício do Departamento de Materiais para o CEMOP, visto o reactor de deposição possuir capacidade de realizar sensores com esta dimensão.

### 1.5.6 Depósito de Silício no sistema do CEMOP

O objectivo inicial era construir sensores utilizando uma “receita” equivalente à descrita na tese de Doutoramento [2], mas em substrato flexível, para se poder comparar as características dos sensores em diferentes substratos. Após a ida ao ‘Laboratório de Filmes Finos para a Electrónica’ na Universidade do Minho, o rumo da construção dos sensores já não era equivalente aos originais, visto que não só utilizaram substratos de diferentes tamanhos, como também as técnicas mudaram, isto é, o processo litográfico foi substituído por máscaras mecânicas. Assim, foi decidido fazer novos depósitos de silício sobre alumínio no reactor do CEMOP. Neste sistema, o tamanho máximo das amostras é de 4 x 4 cm e as actuais máscaras são para um sistema de 3,5 x 3,5 cm.

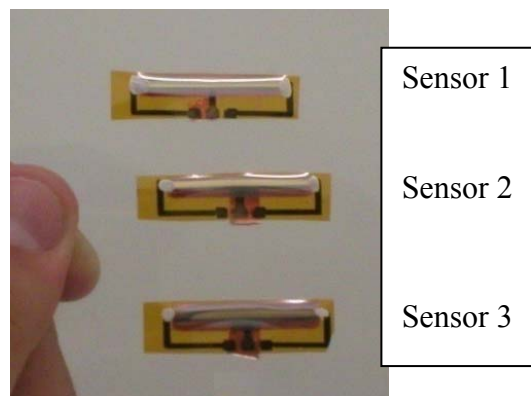
Foi realizado um depósito de silício com as condições descritas na Tabela n.º 3. Neste depósito o silício aderiu ao alumínio, embora existisse vestígios em que o silício não se fixou ao alumínio contudo completou-se todas as etapas do processo de construção dos sensores

porque estas zonas eram fora da zona activa do sensor e na Figura n.º 30 mostra uma fotografia dos sensores terminados e individualizados.

**Tabela n.º 3 – Condições do depósito de a-Si:H realizados no CEMOP**

	[PH <sub>3</sub> ] [%]	[SiH <sub>4</sub> ] [%]	P <sub>d</sub> [mTorr]	J (P) [mW/cm <sup>2</sup> ]	T [min]	T [°]
n	1	30	0,65	0,99 (15 W)	4	200
i	0	8,7	1,4	1,31 (20 W)	41	200

Estes sensores já apresentam uma melhoria, pois embora não estejam a trabalhar, num dos sensores, um dos eléctrodos dava sinal. Realizou-se um recozimento com vista a tentar uniformizar/homogeneizar as películas finas ou as camadas. Este recozimento pode anular possíveis curto-circuitos existentes entre camadas. No entanto, à excepção de um, os sensores não mostraram alterações no seu comportamento. Foram executadas imagens de SEM do sensor 3 que se encontram no anexo 1.



**Figura n.º 30 – Sensores terminados e individualizados.**

### 1.5.7 Síntese do processo de produção dos sensores

Em resumo, de acordo com os vários passos já descritos anteriormente, podemos referir que o processo de produção dos sensores de posição decorreu em diversas fases, marcadas por um conjunto de anomalias que impediram o seu funcionamento inicial correcto.

Houve portanto um processo de optimização que passou por uma alteração a nível das técnicas e dos materiais depositados.

Em termos genéricos, os problemas encontrados situaram-se resumidamente por:

- Aparecimento de microfracturas nos eléctrodos de Crómio, o que colocava os sensores em circuito aberto,
- Situações de aderência defeituosa do Silício sobre o Alumínio.

A Tabela n.º 4 lista as várias etapas na produção dos sensores, decorridas durante a optimização do processo de fabrico dos sensores de posição.

**Tabela n.º 4 – Historial das fases de fabrico de sensores de posição sobre Kapton**

<i><b>Etapas</b></i>	<i><b>Observações</b></i>	<i><b>Estado</b></i>
1	Aderência do substrato de Kapton ao Vidro	Ultrapassado
2	Depósito de poliamidas para constituição do substrato	Não aplicável devido a espessuras reduzidas resultantes
3	Fracturas nos eléctrodos de Crómio	Ultrapassado por substituição do material do eléctrodo
4	Falta de Adesão do Silício ao Alumínio	A necessitar de estudo
5	Criação de eléctrodos com dois materiais	Não aplicável, dada a não aderência do Silício
6	Mudança de Reactor – CEMOP, sem fotolitografia, redução da dimensão dos sensores	Sensores a funcionarem somente modo fotocondutivo

# *Capítulo 2*

**Aparelho de Caracterização de  
Sensores de Posição Flexíveis**

## **2. Desenvolvimento e projecto do sistema de Caracterização de Sensores de Posição Flexíveis**

O objectivo primário da caracterização dos sensores de posição flexíveis é verificar qual influência da flexão mecânica nas propriedades eléctricas dos sensores. Tendo em consideração o objectivo do equipamento, é necessário efectuar medidas de flexão aos sensores e ao mesmo tempo obter as suas propriedades eléctricas. A flexão dos sensores será circular, sendo o raio de curvatura o parâmetro que varia. Para isso, existe uma base com ranhuras circulares concêntricas, em que o sensor é colocado em uma delas. Um laser efectua um varrimento angular de uma extremidade do sensor à outra.

Na Figura n.º 31 está representado esquematicamente o Aparelho de Caracterização de Sensores de Posição Flexíveis. Através da figura observa-se que o aparelho é composto por quatro secções distintas. Uma secção de mecânica, o motor, o suporte o sensor e outro para o laser. A secção de electrónica, para os Conversores Analógicos Digitais (ADC – Analog to Digital Converter), Conversor Digital para Analógico (DAC – Digital to Analog Converter), sensor de temperatura e para a Unidade de Controlo. Uma secção de micro-informática, na unidade de controlo e outra secção de informática para o programa de aquisição de dados por computador. O sistema permite flexibilidade no laser a ser utilizado visto possuir uma saída de 12V com cerca de 800mA de corrente o que se traduz numa saída com uma potência de 9,6W. Desta forma, consegue-se alimentar directamente díodos laser ou ligar um *relé* para ligar laser com potências maiores. O laser utilizado é um modulo de um díodo laser da *Power Technology Inc*, modelo PPM3(635-5), com um comprimento de onda de 635 nm, a trabalhar a 12V, e a vantagem de ser em modulo é que este estabiliza a emissão da radiação. No anexo 2 entram-se os perfis de emissão do laser.

Nas secções seguintes será descrita cada uma das secções que compõem o Aparelho de Caracterização de PSD Flexíveis.

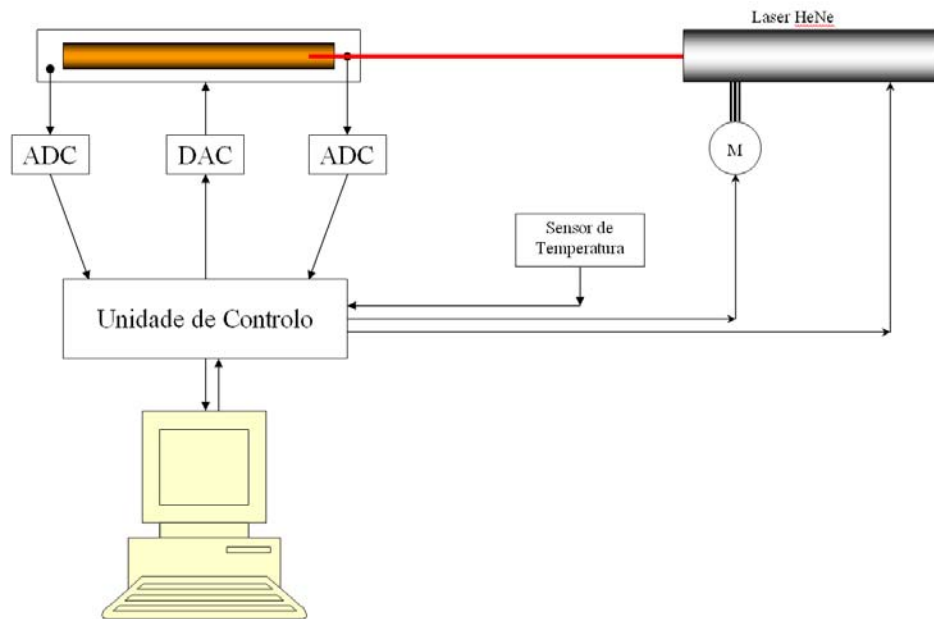
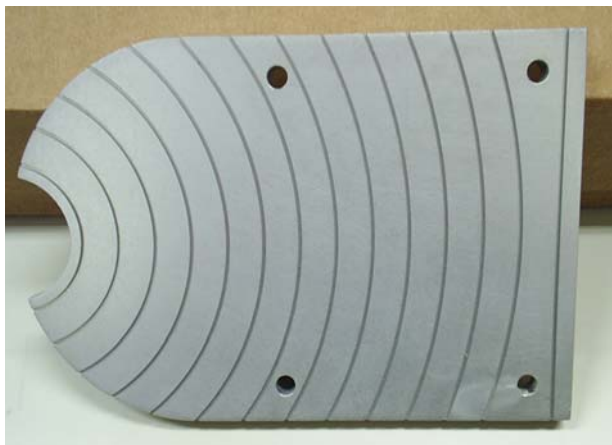


Figura n.º 31 – Esquémático do Aparelho de Caracterização dos Sensores de Posição Flexíveis

## 2.1 Projecto Mecânico

Neste capítulo será apresentado o projecto mecânico do Aparelho de Caracterização de PSD Flexíveis. Como premissas, considere-se o facto dos sensores serem seguros através de ranhuras circulares concêntricas e também o do feixe laser efectuar um varrimento circular ao longo do sensor. Além disso, foi decidido que o equipamento deveria ter um deslocamento mínimo de  $5\mu\text{m}$  a 15 cm do eixo, o que dá um deslocamento angular do suporte do laser de  $0,0019^\circ$  ou  $33,3\ \mu\text{rad}$ .

O suporte dos sensores foi construído em alumínio com ranhuras circulares concêntricas. Os respectivos raios iniciam-se em 2 cm até ao raio de 14 cm, com o espaçamento de 1 cm entre eles. A 15 cm do eixo existe uma ranhura linear. O objectivo desta é caracterizar os sensores PSD flexíveis sem flexão. Com esta configuração pode-se estudar os sensores desde flexão nula, i.e. com o sensor plano, até uma flexão de raio 2cm. Existem também quatro furos com o objectivo de a fixar ao aparelho. Na Figura n.º 32 é apresentada uma fotografia do suporte dos sensores PSD flexíveis.



**Figura n.º 32 – Fotografia do suporte dos sensores**

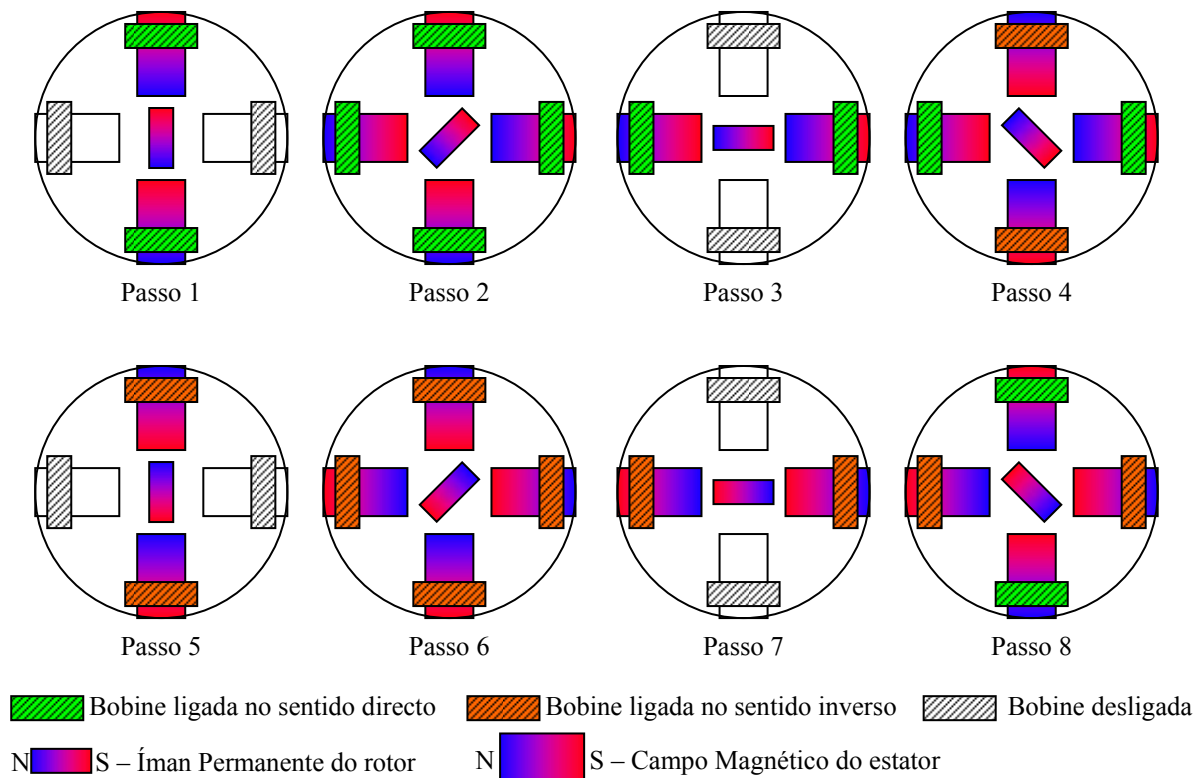
O objectivo do feixe laser ao efectuar um varrimento circular, ao longo do comprimento do sensor, é o de os deslocamentos angulares do laser se traduzirem em deslocamentos finitos equivalentes do feixe luminoso sobre o sensor. Desta forma evitam-se factores de correcção posteriores.

O deslocamento angular do laser é controlado pela ‘Unidade de Controlo’ através dum motor eléctrico, necessitando de posicionar o eixo com grande rigor. No universo dos motores eléctricos existem os motores de passo-a-passo, motores DC com e sem escovas, o motor síncrono de imanes permanentes, o motor de relutância e o motor de indução. A opção mais viável e rápida é utilizar um motor passo-a-passo, por vezes chamado também de motor digital.

Um motor passo-a-passo consiste em, normalmente, dois pares de bobines, ou enrolamentos, que são energizados de forma directa ou inversa e um rotor formado por um imã permanente. Para o rotor executar deslocamentos angulares é necessária uma sequência eléctrica, tal como ilustrado na Figura n.º 33 e por motivos didácticos o motor apresentado somente possui um passo de 90°, sendo o passo definido como o ângulo formado entre os pólos.

Quando o motor é deixado em repouso e alimentado, apresenta um binário não nulo. Esta característica é muito útil em sistemas onde se exija controlo na posição angular do eixo visto que o binário, não nulo, tende a manter o eixo na sua posição angular.





**Figura n.º 33 – Ilustração do funcionamento do motor passo-a-passo, em deslocamentos de meios-passos.**

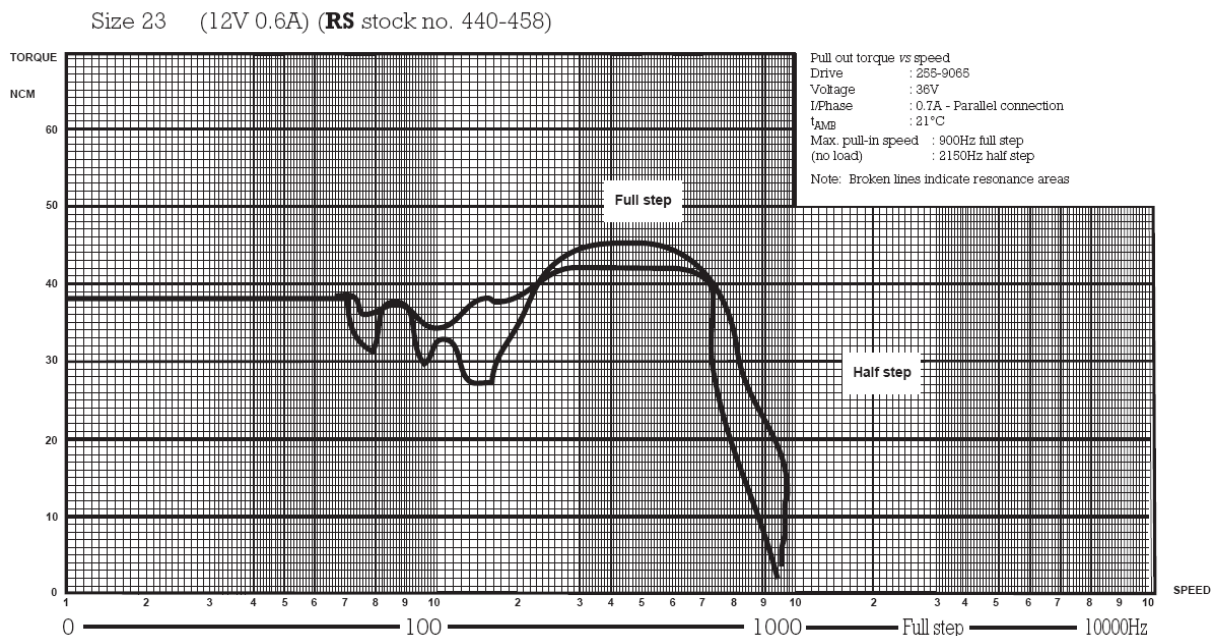
Define-se o movimento no modo de *passo inteiro* quando os enrolamentos estão energizados alternadamente; conforme a Figura n.º 33 equivale aos passos 1, 3, 5 e 7. Este modo não é aconselhado visto que a direcção do movimento é difícil de controlar. No modo de *meio-passo* é considerada a totalidade de passos apresentados na figura. Neste modo, o movimento é mais homogéneo e suave do que no modo de passo inteiro, além da direcção ser mais fácil de controlar. Considerando a primeira bobine o enrolamento formado pelos eléctrodos A e A' e a segunda bobine o enrolamento formado pelos eléctrodos B e B'. A sequência eléctrica completa para o movimento no modo de *meio-passo* encontra-se na Tabela n.º 5. Existe ainda o modo de *micro-passos* que consiste em realizar passos de fracções da tensão de alimentação. O número de passos neste modo depende somente do controlador utilizado.

**Tabela n.º 5 – Sequência eléctrica para o motor executar movimentos angulares, no modo de *meios-passos* (Vcc representa a tensão de alimentação do motor)**

Passo	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>A</b>	Vcc	Vcc	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	Vcc
<b>A'</b>	0 V	0 V	0 V	Vcc	Vcc	Vcc	0 V	0 V
<b>B</b>	0 V	Vcc	Vcc	Vcc	0 V	0 V	0 V	0 V
<b>B'</b>	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	Vcc	Vcc	Vcc

O motor passo-a-passo utilizado foi fornecido pela RS (tamanho 23, 12V, 0.6A e Ref.n.º440-458) com um deslocamento angular entre passos de 1,8° ou 0,9° no modo de *meio-passo*. Não existem motores, no fornecedor, com deslocamento angular mais baixo. Em virtude dum valor tão elevado para a aplicação, o necessário é 0,0019°, é necessário prever uma caixa redutora para alcançar os requisitos estabelecidos.

Na Figura n.º 34 temos os dados técnicos do motor. A velocidade máxima a que o motor pode trabalhar, sem carga, no modo de meio-passo é de 2150Hz. No projecto em análise este valor foi reduzido para 1000Hz. Na Tabela n.º 6 encontramos as principais características do motor passo-a-passo fornecido pela RS.



**Figura n.º 34 – Dados técnicos do motor passo-a-passo, fornecido pela RS.**

**Tabela n.º 6 – Características do motor passo-a-passo RS stock no.440-458**

Características	Voltagem [V]	Corrente [A]	Resistência [ $\Omega$ ]	Indutância [mH]	Precisão do passo [%]	Passo [°]	Classe Isolamento
Motor (Stock no.440-458)	12	0,6	20	32	5	1,8	B

A 15 cm do eixo, deslocamentos lineares de 5  $\mu\text{m}$  correspondem a deslocamentos angulares de 33,3(3)  $\mu\text{rad}$ . A caixa redutora deverá ter no mínimo uma relação de 1:471, visto que 471 é a razão de 0,9° para 33,3(3)  $\mu\text{rad}$ .

Visto tratar-se de uma relação muito elevada, a melhor opção é adquirir no mercado. Como o fornecedor possui caixas redutoras, optou-se pela 500:1, visto que a relação é ligeiramente superior ao necessário. Trata-se de uma caixa com múltiplas sequências de rodas dentadas, tal como se pode verificar pela Figura n.º 35.



**Figura n.º 35 – Fotografia do interior da caixa redutora.**

Com esta caixa consegue-se obter um passo final de 0,0018° o que faz com que a 15 cm se tenha um deslocamento linear do feixe laser de cerca de 4,7  $\mu\text{m}$ . Na Tabela n.º 7 encontra-se o deslocamento linear do feixe laser para cada raio de curvatura das ranhuras.

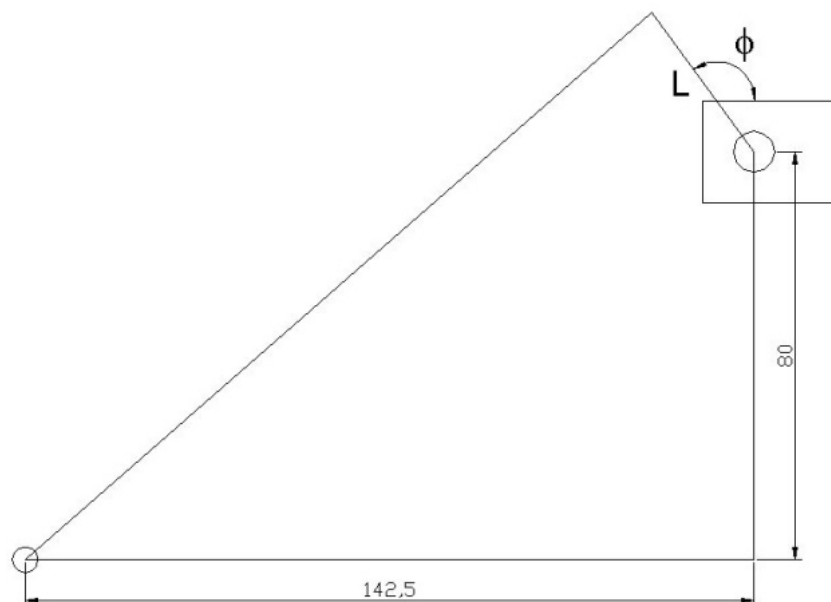
**Tabela n.º 7 – Deslocamento Linear em Função do Raio de Curvatura das Ranhuras.**

Distância [cm]	Resolução [ $\mu\text{m}$ ]	Distância [cm]	Resolução [ $\mu\text{m}$ ]	Distância [cm]	Resolução [ $\mu\text{m}$ ]
2	0,63	7	2,20	12	3,77
3	0,94	8	2,51	13	4,08
4	1,26	9	2,83	14	4,40
5	1,57	10	3,14	15	4,71
6	1,88	11	3,46		

Uma das principais desvantagens do uso deste tipo de caixa redutora são as folgas por ela introduzidas. Para ultrapassar esse problema optou-se por duas soluções. Na primeira, as medidas são tiradas sempre no mesmo sentido, visto que a origem do movimento não é crítica mas sim o deslocamento entre passos. Na segunda solução, implementou-se um mecanismo

para retirar as folgas, baseado no princípio de que se houver uma força de sentido constante, os dentes das rodas dentadas encostam-se, reduzindo a folga da caixa redutora. Utiliza, portanto, o princípio duma alavanca: uma alavanca, ou braço, exerce uma força constante, para que em qualquer posição do eixo, esta reduza a folga da caixa redutora. A força do braço é dada por uma mola e como não existem movimentos bruscos, optou-se por fixar a mola a um dos pilares de suporte dos sensores.

Para o cálculo do ângulo e comprimento do braço, precisam de ser verificadas duas condições. A primeira impõe que com o suporte do laser posicionado na sua posição extrema superior, o braço não pode estar alinhado com a recta que faz o eixo do motor com o pilar de apoio. Se estiver, não existe qualquer força para retirar as folgas. Aplicando esta condição, existirá um ângulo mínimo,  $\Phi$ , no qual o braço não realiza nenhuma força, e para qualquer ângulo superior a este o braço introduz uma força. No caso da segunda condição, com o laser posicionado na sua posição extrema inferior, considera-se que a mola não pode tocar no suporte do laser, assim é necessário calcular a amplitude do braço,  $L$ . As variáveis em questão são ilustradas na Figura n.º 36.



**Figura n.º 36 – Esquema básico do sistema utilizado para retirar as folgas e as medidas existentes no sistema**

Na primeira premissa, conforme observado na Figura n.º 37(a), o suporte do laser está na sua posição extrema superior. O ângulo formado entre o suporte e a horizontal foi limitado a 60°. Na figura pode observar-se os ângulos existentes neste triângulo virtual. O ângulo formado a hipotenusa e o suporte do laser é de 149,3° (360°-60.7°-90°-60°). Qualquer ângulo inferior pode ser escolhido; assim escolheu-se o ângulo de 135° ( $\Phi = 135^\circ$ ).

Na segunda condição, que a mola não pode tocar no suporte do laser, a situação mais crítica acontece quando o suporte se encontra na sua posição extrema inferior, conforme é visualizado na Figura n.º 37(b). O vértice do suporte do laser encontra-se no ponto (128,84 ; 83,66) considerando que a origem se encontra no centro dos pilares de apoio. Para cumprir esta premissa, um triângulo rectângulo deverá ser, no mínimo, igual ao seguinte:

- A hipotenusa é o segmento de recta que une o vértice á origem, que possui o valor de  $\approx 153,6$  mm.
- O cateto oposto tem de ter de comprimento 5 mm, o que é equivalente ao raio da mola.

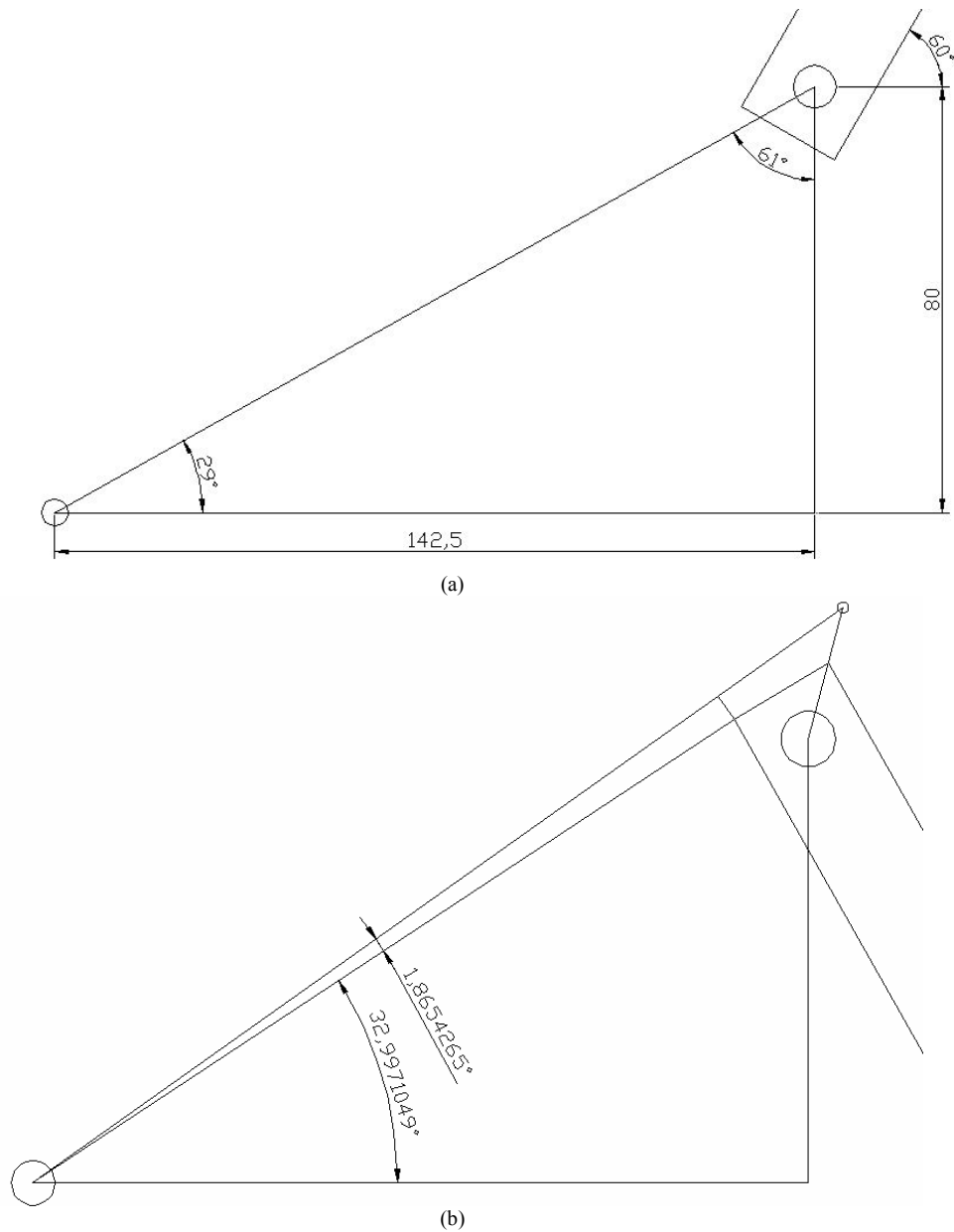
Com estes valores, o ângulo deste triângulo é de  $\approx 1,87^\circ$  e somando o ângulo formado pela hipotenusa com a horizontal, resulta que o cateto adjacente faz um ângulo com a horizontal de  $\approx 34,86^\circ$ . A equação da recta, em que este segmento é concorrente, é:

$$y = \text{tg}(34,86).x \quad (45)$$

Com o suporte nesta posição, o ângulo que o braço forma com a horizontal é de 75°. A equação da recta do braço da recta é:

$$(y - 83,66) = \text{tg}(75^\circ).(x - 128,84) \quad (46)$$

O ponto em que as duas rectas são coincidentes é (148,85 ; 103,69) e sabendo que a distância entre este ponto e eixo do suporte do laser é o comprimento mínimo do braço, obtemos o valor de 24,53 mm. Assim optou-se por fazer o braço com um comprimento, L, de 30 mm.



**Figura n.º 37 – Suporte do laser (a) na sua posição extrema superior e (b) na sua posição extrema inferior**

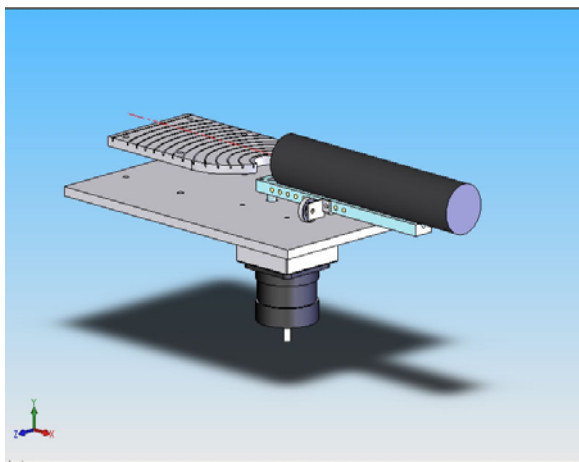
Um parâmetro relevante é o comprimento da mola, quer em repouso quer em distensão total. Com os valores escolhidos para o braço, a mola terá de ter um comprimento inicial de 134,55 mm e ser distendida até aos 181,41 mm. A mola escolhida apresenta um comprimento de 80 mm em repouso e foi distendida até os 200 mm sem ficar deformada, valores esses que abranjem todo o intervalo de trabalho. Na Figura n.º 38 encontra-se a fotografia do braço para retirar folgas.



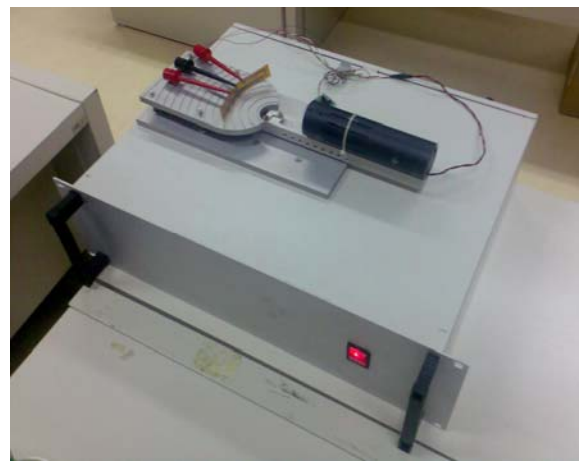
**Figura n.º 38 – Fotografia do mecanismo para retirar as folgas da caixa redutora.**

Uma caixa redutora amplia o binário de saída do sistema com a razão de desmultiplicação. No presente projecto, a caixa redutora possui uma relação de 500:1, assim teoricamente, o binário do motor, que pode chegar aos 40 N.m, seria aumentado 500 vezes. Porém os dentes das rodas dentadas da caixa só aguentam 4 N.m, pelo que, a escolha da mola não é crítica, visto o sistema fornecer um binário (relativamente) elevado.

Por fim, todo o conjunto foi montado numa caixa em que no seu topo se encontra a mecânica e no seu interior a electrónica (incluindo a fonte de alimentação). Na Figura n.º 39 pode observar-se (a) uma representação esquemática da parte mecânica do aparelho, bem como, (b) sua fotografia. No anexo 3 encontra-se os desenhos técnicos do sistema.



(a)



(b)

**Figura n.º 39 – (a) Representação do Aparelho de Caracterização de PSD Flexíveis e (b) sua fotografia.**

## 2.2 Projecto Eléctrico

Para a construção do Aparelho de Caracterização de PSD Flexíveis, como se descreve esquematicamente a Figura n.º 31 (página 63), havia duas opções. Na primeira, comprar placas de aquisição de dados e um controlador para o motor passo-a-passo e na segunda, adquirir um microprocessador e alguns componentes externos para controlar cada um dos itens individualmente. A escolha pela segunda opção foi puramente financeira.

O coração do equipamento é a unidade de controlo. Esta tem um microprocessador da empresa Microchip da série PIC18. Trata-se de um microprocessador RISC (Reduced Instruction Set Computer) de alto desempenho e na Tabela n.º 8 encontram-se as principais características.

**Tabela n.º 8 – Dados técnicos do microprocessador PIC18F4550**

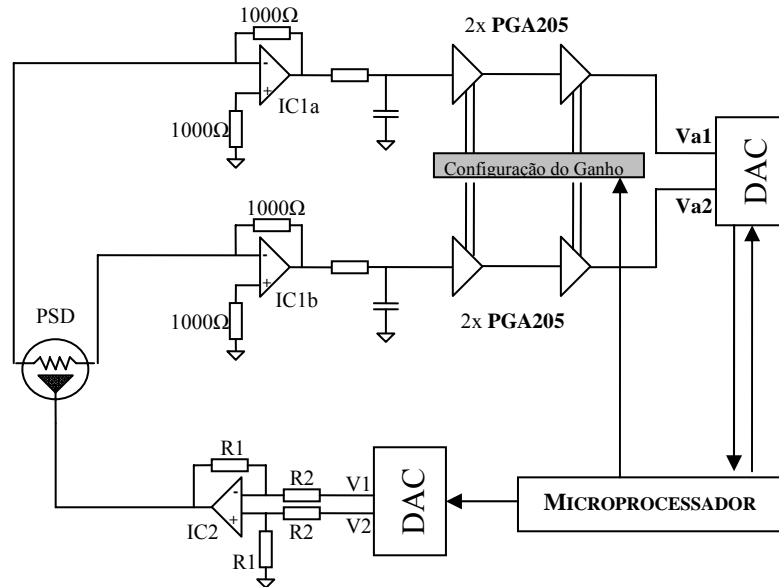
Memória Programa		Memória Dados		I/O	Canais ADC	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EAUSART	Comparadores	Temporizadores 8/16 Bits
Bytes	Instruções	SRAM	EEPROM					SPI	I <sup>2</sup> C			
32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Sim	Sim	Sim	1	2	1/3

Para o controlo do motor passo-a-passo, o projecto foi baseado numa ‘nota de aplicação’ (*applications notes*) da Microchip com a referência AN822, a qual mencionava que o integrado L298 controlava o motor. Trata-se de um integrado especializado para o efeito, precisando somente de alguns componentes externos de protecção. Embora a nota tivesse por objectivo criar um controlador de micro-passos, no projecto optou-se somente por manter o motor a trabalhar no modo de meios-passos.

Para caracterizar o sensor de posição é necessário uma tensão de polarização e ler o sinal proveniente da camada resistiva, em cada eléctrodo. O esquema do circuito é visualizado na Figura n.º 40. Nele constam dois blocos principais, o conversor digital - analógico (DAC –



Digital to Analogic Converter) e o conversor analógico - digital (ADC – Analogic to Digital Converter) sendo que ambos são controlados pelo microprocessador.



**Figura n.º 40 – Esquemático do circuito electrónico de obtenção de sinal do sensor de posição**

Na Figura n.º 40, o bloco do conversor digital - analógico é formado por dois componentes principais, o conversor DAC duplo e um amplificador operacional. O conversor DAC é o AD7302 de 8 bits e a sua montagem foi realizada conforme sugerido pela sua folha técnica. Em ambas as tensões, a variação é de 0 V até 5,12 V em passos de 20 mV.

O amplificador operacional, IC2, é montado no modo diferencial, com um ganho de 2, para cada canal do conversor digital – analógico. A fórmula de ganho do amplificador é [24]:

$$G = \frac{R1}{R2} \quad (47)$$

Com  $R1 = 10 \text{ K}\Omega$  e  $R2 = 20 \text{ K}\Omega$  a expressão da tensão de polarização é:

$$V_{\text{Polarização}} = \frac{R1}{R2} (V_2 - V_1) = 2 \cdot (V_2 - V_1) \quad (48)$$

Com os componentes dispostos desta forma, consegue-se efectuar um varrimento desde -10 V até +10 V em passos de 40 mV.

O bloco para a aquisição do sinal proveniente do sensor inicia-se com utilização de um pré-amplificador de transimpedância, para cada canal. O ganho deste amplificador, nesta

configuração, é dado pela resistência de realimentação, assim, com os valores dados na Figura n.º 40 o ganho é de 1000. Utilizou-se uma resistência do pino ‘não inversor’ igual ao valor da resistência de realimentação para reduzir o erro devido à corrente de fuga do amplificador operacional.

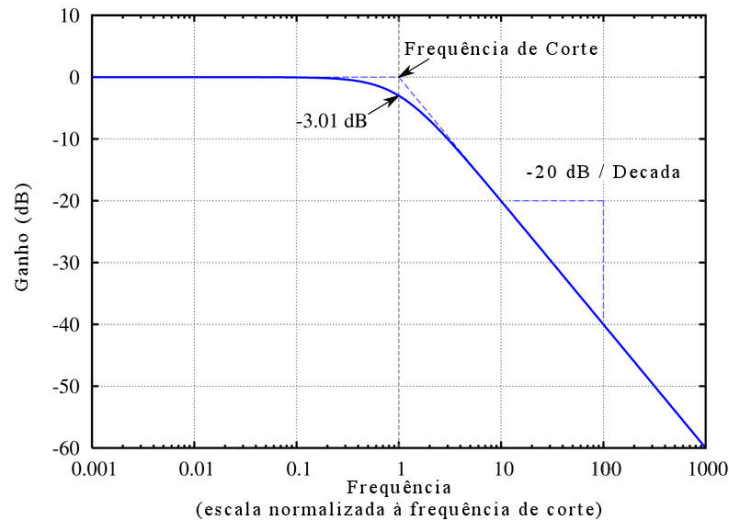
O amplificador operacional utilizado para o pré-amplificador é o LF353 (fabricado pela ‘National Semiconductor’) o qual, por conter dois amplificadores operacionais, garante uma maior semelhança entre os pré-amplificadores. Além disso, como as suas entradas são do tipo JFET faz com que os pré-amplificadores apresentem uma elevada impedância de entrada ( $10^{12} \Omega$ ), reduzida corrente de fuga na entrada (50 pA), baixo ruído na entrada e baixo desvio de tensão. As aplicações deste circuito integrado vão desde integradores rápidos, conversores D/A rápidos até circuitos do tipo ‘*sample and hold*’.

Após o pré-amplificador segue-se um filtro passa-baixo de primeira ordem. Este filtro serve não só para eliminar ruído de frequências mais elevadas mas também serve como filtro ‘*anti-aliasing*’. ‘Aliasing’ refere-se à sob amostragem do sinal por parte do ADC, por outras palavras, a frequência do sinal deve ser, pelo menos, metade da frequência de amostragem, de acordo com o teorema de Nyquist. O conversor tem uma velocidade máxima de 100’000 amostras/segundo, mas como é dividida pelos dois canais, a frequência por canal é de 50 KHz.

A equação que determina a frequência de corte do filtro em função da resistência e do condensador é:

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (49)$$

E a sua resposta em frequência está demonstrada na Figura n.º 41. Os valores escolhidos para a resistência e para o condensador são de  $100\Omega$  e  $1,6 \mu F$ , respectivamente. Com estes valores o filtro está sintonizado para que a sua frequência de corte seja na ordem de 1KHz. Com este valor para o filtro cumpre-se integralmente o teorema de Nyquist.



**Figura n.º 41 – Curva de resposta dum filtro de 1ª ordem.**

A seguir ao filtro segue-se o andar de amplificação, caracterizando por utilizar um amplificador de ganho programável (PGA, programmable gain amplifier), o PGA205 fabricado pela ‘Burr-Brown’. Este integrado permite amplificações de 1, 2, 4 e 8 V/V, e por cada canal são utilizados dois integrados, obtendo assim um ganho máximo de 64 V/V. O objectivo deste andar de ganho é produzir um sistema de ganho dinâmico e assim ajustar a escala ao máximo do sinal do sensor. Com esta flexibilidade pode-se estudar o sensor iluminado assim como observar a sua corrente no escuro.

O conversor analógico/digital o ‘MCP3208’ fabricado pela ‘MicroChip’, que converte o sinal procedente do sensor com uma resolução de 12 bits, i.e., para uma referência de 4,096V digitaliza o sinal com um erro de 1 mV. O ganho total máximo é, por canal, de 64000 I/V, e podendo distinguir sinais de corrente com uma amplitude de 15,6 nA. O erro introduzido pelos amplificadores não chega a 1 nV para uma banda de 1 KHz. Na Tabela n.º 9 observamos, em função do valor de amplificação, a corrente máxima e a resolução de aquisição.

**Tabela n.º 9 – Valores máximos de corrente admissível no sensor e resolução correspondente em função da amplificação do sinal.**

Amplificação [x1000 I/V]	Valor Máximo de Corrente [ $\mu$ A]	Resolução [nA]
1	4096	1000
2	2048	500
4	1024	250
8	512	125
16	256	62,5
32	128	31,3
64	64	15,6

A tensão de referência para ambos os conversores, o ADC e o DAC, é obtida através de um integrado especializado, o *REF02*, com um valor de 5 V. O integrado permite ajustar a tensão de saída e a vantagem é aumentar o valor de referência para 5,12 V, conforme as *folhas técnicas* do integrado indicam. Através de amplificadores operacionais trabalha-se essa tensão de referência para outras duas, de 4,096 V e 2,560 V, para o ADC e DAC, respectivamente. O esquema do circuito encontra-se no anexo 4.

### 2.3 Projecto de Informática

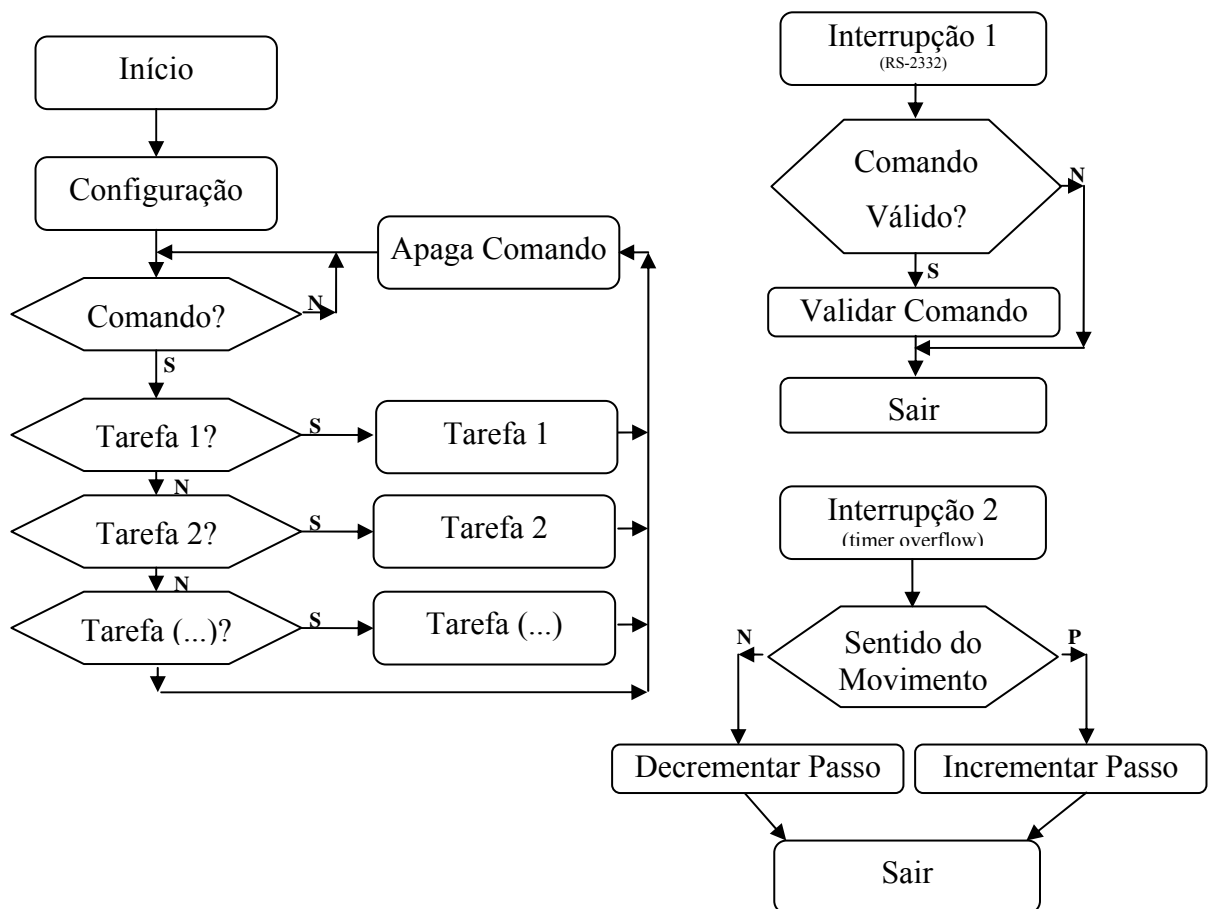
No âmbito da construção do Aparelho de Caracterização de PSD, existe, como visualizado na Figura n.º 31, duas componentes em que é necessário programação: na Unidade de Controlo e no Computador. Nesta secção serão descritos ambos os programas, quer o da Unidade de Controlo, feito em C, quer o do Computador, feito em Visual Basic.

Como mencionado anteriormente, a unidade de controlo faz a gestão de todo o equipamento da aparelho e a maneira mais simples de o fazer é utilizando um microprocessador. Na Figura n.º 42 é apresentado o Fluxograma simplificado do código da unidade de controlo.

No anexo 5 segue o código em ‘C’ da unidade de controlo. O programa inicia-se configurando os periféricos nele existente, tais como o módulo de comunicação RS-232, o temporizador para o movimento do motor passo-a-passo, o sentido de comunicação dos seus pinos e as suas interrupções. Após a configuração, o microprocessador entra num ciclo

fechado à espera dum comando válido transmitido pelo computador, através da porta de comunicação RS-232.

Quando o microprocessador recebe um comando, procedente da porta de comunicações série RS-232, interrompe o programa principal e verifica se o comando é válido. Se o comando for válido, transfere o comando da variável temporária de comunicações para a variável de execução. Este processo é o ‘validar comando’ do Fluxograma.



**Figura n.º 42 – Fluxograma simplificado do programa da unidade de controlo.**

Já no código principal, o microprocessador ao verificar que possui um comando vai executar a tarefa correspondente ao comando. A Tabela n.º 10 contém os comandos e as tarefas associadas. A maioria dos comandos possui uma dupla função.

**Tabela n.º 10 – Lista de comandos do Aparelho de Caracterização de PSD's**

<b>Comando</b>	<b>Tarefa</b>	<b>Resposta</b>
K	KILL (comando de paragem de emergência e desliga o Laser e o motor)	sem resposta
I	Liga e desliga o laser	Estado do laser
L	Liga e desliga o motor passo-a-passo	Estado do motor passo-a-passo
O	Posiciona o suporte do laser na origem	0 – se o motor não estiver na origem
W	Escreve na EEPROM o valor da posição enviado	Escreve na EEPROM o valor da posição enviado
D	Distância a percorrer (em passos)	Distância a percorrer (em passos)
H	Sentido do motor ou inverte o sentido	Sentido do motor ou inverte o sentido
V	Velocidade do motor ( $\mu$ segundo / passo)	Velocidade do motor ( $\mu$ segundo / passo)
P	Posição do motor ou a distância a percorrer para a posição indicada	Posição do motor ou a distância a percorrer para a posição indicada
G	Manda percorrer a distância em memória	Manda percorrer a distância em memória
B	Muda o sentido do movimento e percorrer a distância em memória	Muda o sentido do movimento e percorrer a distância em memória
T	Tensão de Polarização (valor para a DAC)	Tensão de Polarização (valor para a DAC)
S	Sinal procedente da ADC	Sinal procedente da ADC
A	Ganho para ambos os PGA's	Ganho para ambos os PGA's
Z	Ganho para o PGA da linha 1 do sensor	Ganho para o PGA da linha 1 do sensor
X	Ganho para o PGA da linha 2 do sensor	Ganho para o PGA da linha 2 do sensor
R	Reset por software	sem resposta
M	PWM do microprocessador (Pulse With Modulation)	PWM do microprocessador (Pulse With Modulation)

A estrutura de envio de comandos para o microprocessador tem de ser a seguinte:

‘#’ + Caracter de comando + Argumento do comando + Código 13 de ASCII

Com o caracter inicial ‘#’ o microprocessador sabe que estamos perante um novo comando e executa uma limpeza as variáveis de comunicação. Todos os caracteres seguintes são acrescentados a uma variável de texto até ao máximo de 31 caracteres ou a recepção do código 13 de ASCII. Este código é o equivalente ao ‘Enter’ dum teclado. Com a recepção do código 13 e se no início existir o caracter ‘#’, o programa de comunicação valida o comando.

Já no programa principal, este verifica o segundo caracter do comando (caracter de comando) e executa a tarefa associada a este. No interior de cada tarefa, o programa verifica se existe argumento ou não. No caso de não haver argumento, o programa entende que o programa está a perguntar o estado ou o valor existente dessa tarefa. Por exemplo, o comando ‘I’ liga e desliga o laser, se não houver argumento, o programa responde ao computador o estado do laser, ou seja, se este se encontra ligado ou não.

No entanto, existem comando que não necessitam de argumento para executar a tarefa.

Eles são:

- ‘K’ – Pára de executar tudo o que o microprocessador está a fazer e desliga o laser.

Envia para o computador a posição actual do laser

- ‘G’ – inicia marcha do motor mas se este já estiver em andamento responde com “#G-ON”

- ‘B’ – Muda o sentido de marcha do motor mas se este já estiver em andamento responde com “#G-ON”

- ‘R’ – Executa um ‘reset’ do microprocessador, o que repõem os valores por defeito

Embora a unidade de controlo faça a gestão do todo o hardware, compete ao computador comunicar à unidade de controlo o valor dos parâmetros para caracterizar os sensores de posição. Partindo desta premissa foi feito um programa no computador, em Visual Basic, para aquisição de sinal do sensor. Na Figura n.º 43 encontra-se o ecrã do programa e no anexo 5 está o *código fonte* do programa. Nele pode-se observar que foi executado um varrimento preliminar dum sensor.

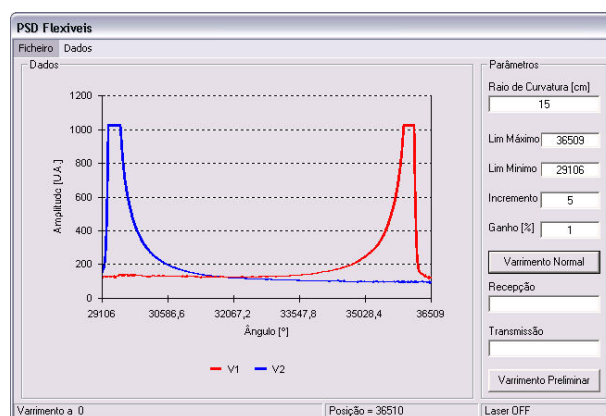


Figura n.º 43 – Ecrã do programa de caracterização de sensores de posição flexível

No varrimento preliminar, a unidade de controlo posiciona o laser numa extremidade do suporte, que depende do raio de curvatura introduzido na caixa dos parâmetros, e executa um varrimento rápido até à outra extremidade.

## ***2.4 Resultado do sistema de caracterização de sensores***

Neste projecto é muito importante saber com exatidão em que posição se encontra o feixe e neste capítulo serão abordados uma série de experiências nas quais se indica o erro de posicionamento do leixe luminoso.

O motor tem um passo de  $1,8^\circ$ , mas como o controlador o faz andar em meio-passo de cada vez, o deslocamento mínimo é de  $0,9^\circ$  no eixo. O motor utilizado possui uma precisão no ângulo do passo de 5% (Tabela n.º 6, página 66), o que significa que cada passo é de  $0,900^\circ \pm 0,045^\circ$ , ou em radianos,  $15,7 \pm 0,8$  mrad.

A caixa redutora não traz nenhuma referência nem às folgas nem aos erros introduzidos; assim, como existe um sistema para retirar as folgas do sistema, pode-se afirmar que, num sentido de deslocamento angular, a caixa introduz um erro no posicionamento reduzido. A caixa redutora tem uma relação de 500:1 o que dá uma precisão final no eixo do laser de  $31,4 \pm 1,6$   $\mu$ rad.

Para determinar o erro introduzido pela caixa redutora realizou-se uma montagem experimental que consiste em colocar o aparelho a 15 metros de distância dum alvo e fazer incrementos constantes e registar qual o deslocamento (d). Repetiu-se dez vezes a experiência para, estatisticamente, se obter um resultado fidedigno. Esta montagem, encontra-se esquematizada na Figura n.º 44 e o resultado é apresentado na Tabela n.º 11.



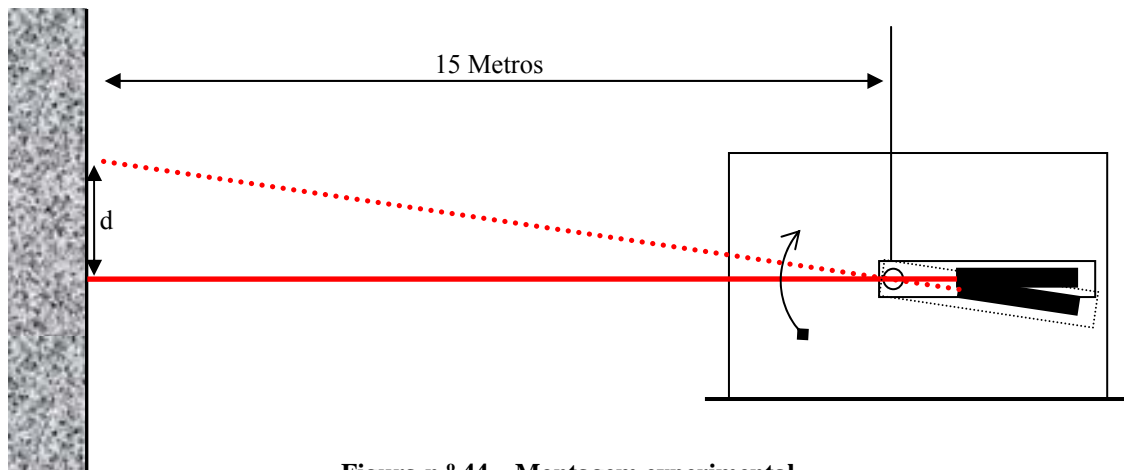


Figura n.º 44 – Montagem experimental

Tabela n.º 11 – Diferença ente posições consecutivas, sua média e desvio padrão.

Número Varrimentos	Diferença entre posições [mm]									Média	Des.Pad	%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	92	90	92	91	86	85	91	90	92	89,9	2,5	5,49%
2	93	91	93	90	85	85	92	90	92	90,1	2,9	6,49%
3	93	93	91	91	84	86	93	90	91	90,2	3,0	6,55%
4	94	91	92	91	84	86	93	90	90	90,1	3,0	6,74%
5	94	91	92	91	85	86	92	90	91	90,2	2,7	6,07%
6	94	91	92	90	84	86	94	90	91	90,2	3,1	6,87%
7	94	91	92	91	85	85	92	90	91	90,1	2,9	6,49%
8	94	91	92	92	84	86	92	91	90	90,2	3,0	6,67%
9	94	91	93	91	84	86	93	90	91	90,3	3,1	6,92%
10	93	91	92	91	86	87	91	90	91	90,2	2,1	4,76%

Como se pode observar, tem-se uma precisão nas medidas do deslocamento de 7%.  
Devido ao facto de se estar a medir num alvo plano, os deslocamentos angulares, a expressão para o cálculo do ângulo é:

$$\sin(\theta) = \frac{d}{L} \quad (50)$$

Como a amplitude máxima é de 54,1 mrad, pode-se afirmar que  $\sin(\theta) = \theta$ , porque a diferença entre valores é de 0,05%, assim converte-se a Tabela n.º 11 na Tabela n.º 12.

Tabela n.º 12 – Deslocamentos angulares consecutivos realizado pelo laser, sua média e desvio padrão.

Número Varrimentos	Diferença entre posições consecutivas [ $\mu$ rad]									Média	Des. Pad	%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	6133	6000	6133	6067	5733	5667	6067	6000	6133	5993	165	5%
2	6200	6067	6200	6000	5667	5667	6133	6000	6133	6007	195	6%
3	6200	6200	6067	6052	5615	5733	6200	6000	6067	6015	197	7%
4	6267	6067	6133	6067	5600	5733	6200	6000	6000	6007	202	7%
5	6267	6067	6133	6067	5667	5733	6133	6000	6067	6015	183	6%
6	6267	6067	6133	6000	5600	5733	6237	6030	6067	6015	207	7%
7	6267	6067	6133	6067	5667	5667	6133	6000	6067	6007	195	6%
8	6267	6067	6133	6133	5600	5733	6133	6067	6000	6015	201	7%
9	6267	6067	6200	6067	5600	5733	6200	6000	6067	6022	208	7%
10	6200	6067	6133	6067	5733	5800	6067	6000	6067	6015	143	5%

Em cada deslocamento, teoricamente, o feixe laser deslocou-se 6126  $\mu$ rad. Observa-se que este valor se encontra dentro do intervalo de erro obtido, conforme mostra a Figura n.º 45. Assim, pode-se afirmar que o conjunto caixa redutora e o braço para reduzir folgas acrescentam um erro no ângulo de 2% e o erro final é de  $\pm 7\%$  no posicionamento angular.

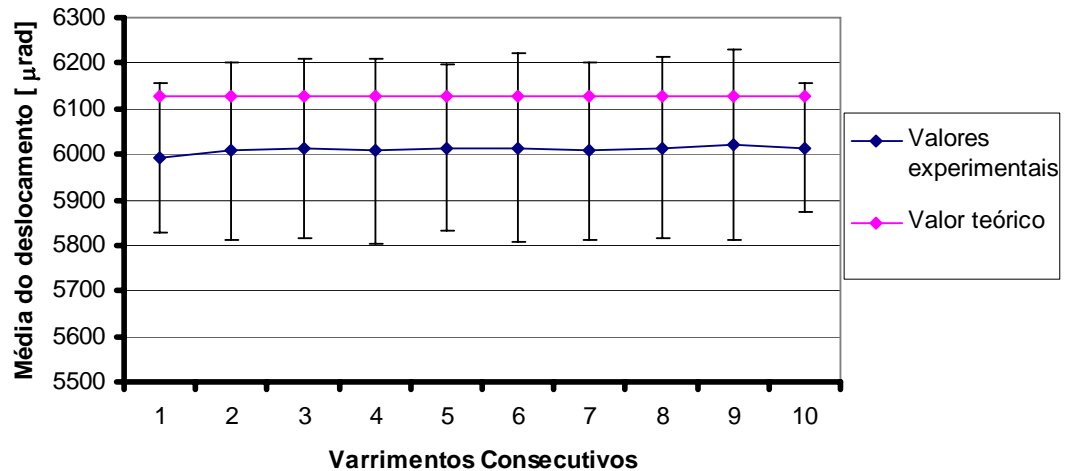


Figura n.º 45 – Gráfico da média dos deslocamentos angulares em cada varrimento, e seu respectivo erro, em função do n.º de varrimentos.

# *Capítulo 3*

## **Resultados e conclusões**

### 3. Resultados e conclusões

Neste capítulo serão abordados o estudo do sensor de posição, as conclusões e trabalho futuro. Utilizando o sistema de caracterização de sensores de posição, mostrar-se-á o estudo de um deles.

#### 3.1 Validação da Plataforma

Com o aparelho, utilizou-se um sensor de posição comercial e caracterizou-se-o. Trata-se dum sensor produzido pela UDT Inc, modelo PIN LSC-30D, de 30 mm de comprimento da zona activa. O sensor foi colocado a 15 cm do eixo do laser, em que cada ponto é a média de 256 medidas, o resultado é apresentado na Figura n.º 46.

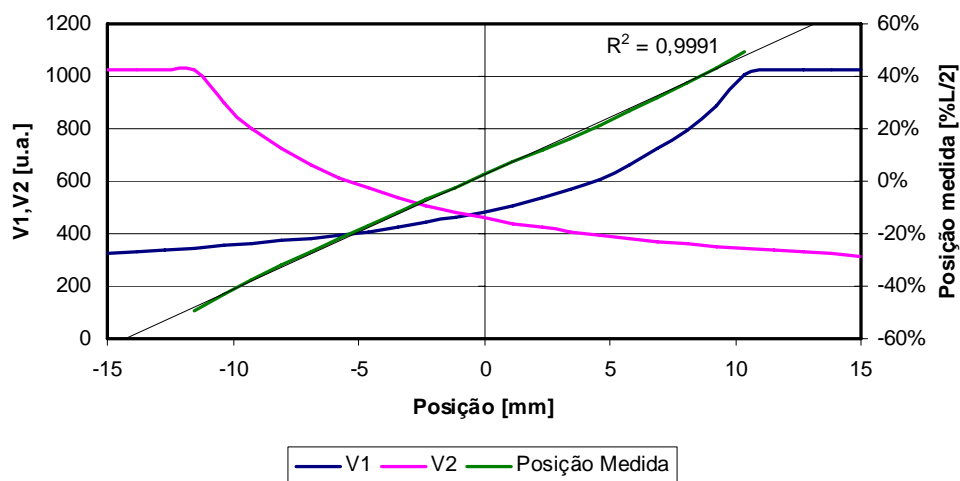


Figura n.º 46 – Valores obtidos para um sensor de posição comercial com o ‘Aparelho de Caracterização de PSD’.

Como já mencionado, o sensor não deve ser utilizado na sua totalidade; assim, para se obter maior exactidão, a amplificação dos sinais foi aumentada, por ser dinâmica, de forma a que na zona de estudo, cerca de 66% da área activa do sensor, se ter o máximo de ganho. Por esta razão, a zona activa perto dos eléctrodos encontra-se saturada, valor de 1023, daí o sinal estar plano nessa região.

A linearidade da zona activa, através do *coeficiente de correlação de Pearson*,  $R$ , que mede o grau de correlação entre duas variáveis, possui um valor de 99,96%. Usualmente

assume-se que valores compreendidos entre 90% e 100% que existe uma correlação muito forte entre as duas variáveis, sendo que  $R=100\%$  corresponde a uma correlação perfeita entre as duas variáveis.

### **3.2 Conclusões**

Para a concretização do trabalho foram consideradas duas etapas; a primeira envolvendo o fabrico dos sensores e a segunda consistindo no projecto e construção do equipamento para caracterizar os sensores de posição flexíveis em função da flexão mecânica.

Para o fabrico dos sensores de posição em substrato flexível seguiu-se uma ‘receita’ já testada, executada sobre um substrato de vidro. A única alteração inicial foi a mudança de substrato pois assim teríamos base de comparação entre os sensores fabricados em Kapton e os fabricados em substrato de vidro. Devido ao facto do substrato ser flexível e dos equipamentos não estarem optimizados para substratos poliméricos, utilizou-se vidro como suporte para o substrato. Após cada etapa, o substrato precisa ser desmontado do seu suporte de vidro para ser limpo com o objectivo de evitar que este fique colado ao vidro. Verificou-se que o crómio não é um bom material para eléctrodos em Kapton pois após o depósito, este fica fissuras deixando o metal de conduzir ao longo do eléctrodo. Verificou-se também a necessidade de aplicar uma tensão de polarização, possivelmente pela espessura de óxido ser espessa.

O equipamento para caracterização dos sensores de posição flexíveis projectado e concebido no decorrer deste trabalho é constituído por vários componentes, tais como o suporte para os sensores, suporte para o laser e electrónica para aquisição de dados e controlo do equipamento.

O suporte para o sensor possui várias ranhuras circulares concéntricas que vão desde os 2 cm até aos 14 cm e uma ranhura linear a 15 cm do eixo. Também é possível testar sensores planos e a existência da ranhura plana permite a sua caracterização imediatamente após o seu

fabrico. O objectivo das ranhuras é provocar uma flexão no sensor e a sucessão de ranhuras com raios desde 14 cm até 2 cm permite uma variação no valor da flexão cada vez mais acentuada, de forma a se inferir o ângulo limite para o qual os sensores ainda conseguem responder.

O suporte do laser possui um apoio em ‘V’, em que a aresta do vértice é coincidente com o eixo de rotação do suporte, o que possibilita que qualquer laser de forma cilíndrica, assente nas duas arestas laterais do ‘V’ ficando automaticamente alinhado com o eixo. A amplitude do ângulo realizado pelo suporte do laser é de  $\pm\pi/3$  rad ( $\pm 60^\circ$ ), possuindo uma resolução de 31,4  $\mu$ rad com um erro de 7%. O controlo do laser é efectuado através de um relé, com ligações para o exterior, permitindo ligar qualquer tipo de laser. Os estudos foram efectuados com um díodo laser de 5 mW para o comprimento de onda de 635 nm.

O sensor é fixo numa ranhura e é ligado ao equipamento. Estas ligações consistem em duas para aquisição de sinal e uma tensão de polarização. A tensão de polarização pode ser ajustável entre os -10V e os +10V, em passos de 40 mV.

Existe uma secção de aquisição de sinal com amplificadores de ganho programável, por canal, com capacidade de amplificar o sinal do sensor, no máximo, em 64 000 I/V e conversores analógicos/digitais de 12 bits para uma tensão aquisição máxima de 4,096 V. O resultado é o circuito poder distinguir sinais de corrente com uma amplitude de 15,6 nA para uma corrente de entrada máxima de 64  $\mu$ A, quando a amplificação se encontra no máximo, e 1  $\mu$ A para uma corrente máxima de 4 mA quando a amplificação é a mínima. Com esta dinâmica na aquisição de dados é possível, sem remover o sensor, adquirir o seu comportamento quer no escuro quer quando iluminado.

O software de aquisição de dados permite gravar os dados num formato que permite a exportação dos dados para folhas de cálculo, como por exemplo o Excel. Na folha de cálculo pode-se corrigir, para a aquisição com o sensor localizado na ranhura plana, o efeito de curvatura provocado pelo deslocamento angular constante sobre uma superfície plana.

A síntese do processo de produção dos sensores é:

- O crómio não é um bom material para eléctrodos no Kapton porque após o depósito que ele fica fracturado,
- Necessidade de limpar o substrato, especial de após processos que envolvam acetona,
- Aplicação de uma tensão de polarização, possivelmente pela espessura de oxido ser espessa.

Em relação ao sistema de caracterização de sensores de posição, foi possível concluir o seguinte:

- Possibilidade de ligar qualquer laser através de um réle
- Amplitude do deslocamento do laser de  $\pm\pi/3$  rad ( $\pm 60^\circ$ )
- O deslocamento angular mínimo de 31  $\mu$ rad com um erro de 7% ( $\pm 2$   $\mu$ rad)
- A tensão de polarização pode variar entre os -10 V até aos 10 V, em passos de 40 mV
- Amplificação dinâmica em que o ganho pode ser ajustado entre 1 000 e 64 000 I/V
- Conversor de analógico para digital de 12 bits numa gama de 0 V até 4,096V
- Sinal de entrada máximo de 4 mA e uma resolução que pode ir até aos 15,6 nA

Neste trabalho atingiu-se o objectivo de criar um equipamento para o estudo de em flexão de sensores de posição flexíveis em que a caracterização eléctrica é toda efectuada no equipamento. A electrónica de aquisição permite, sem desmontar o sensor, estudar o seu comportamento quer no escuro quer iluminado, por manipulação do ganho dos amplificadores, além de permite pôr o sensor em modo fotovoltaico ou em modo fotocondutivo, através da tensão de polarização.

### **3.3 Trabalho Futuro**

Para trabalho futuro sugerimos o seguinte:

- Estudo acerca dos factores envolvidos na fractura do crómio sobre o Kapton,
- Estudo da falta de aderência do silício ao alumínio,
- Máscaras mecânicas metálicas para o fabrico dos sensores, de 3,5 x 3,5 cm, para construir somente um sensor,
- Maior profundidade nas ranhuras do suporte dos sensores para uma melhor fixação dos sensores,
- Pinças de ligação de menores dimensões.



# *Bibliografia*

## 4. Bibliografia

- [1] <http://www.techonologyreview.com/nanotech/18159>
- [2] Hugo Manuel Brito Águas; “Dispositivos de Estrutura Metal / Isolante / Semicondutor – MIS: Aplicação a Sensores de Posição de Silício Amorfo”; Tese de Doutoramento; Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa; 2005
- [3] H. Águas, L. Perreira, L. Raniero, D. Costa, E. Fortunato, R. Martins; “Investigation of a-Si:H 1D MIS position sensitive detectors for application in 3D sensors”; *Journal of Non-Crystalline Solids* 352, pag. 1787-1791; 2006
- [4] H. Águas, S. Pereira, D. Costa, P. Barquinha, L. Pereira, E. Fortunato, R. Martins; “3 dimensional polymorphous silicon based metal-insulator-semiconductor position sensitive detectors”; *Thin Solid Films* 515 (2007) 7530–7533
- [5] A. Calderón, C. Martínez-Rivero, F. Matorras, T. Rodrigo, M. Sobrón, I. Vila, A.L. Virto, J. Alberdi, P. Arce, J.M. Barcala, E. Calvo, A. Ferrando, M.I. Josa, J.M. Luque, A. Molinero, J. Navarrete, J.C. Oller, C. Yuste, C. Köhler, B. Lutz, M.B. Schubert, J.H. Werner; “Large-size high-performance transparent amorphous silicon sensors for laser beam position detection”; *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 565 (2006) 603–611
- [6] J. Moromisato, S.Reucroft, R. Terry, E. von Goeler, D. Eartly, and K. Maeshima, "The development of totally transparent position sensors", *Nucl. Instr. and Meth. A*, vol. 538, pp. 234-242, 2005.
- [7] K. Tsuji, K. Hayashi, J.H. Kaneko, F. Fujita, A. Homma, Y. Oshiki, T. Sawamura, M. Furusaka; “Development of high resolution position sensitive UV detector based on highly oriented polycrystalline diamond”; *Diamond & Related Materials* 14 (2005) 2035 – 2038
- [8] W.Schottky, Über den entsehungsort der photoelektronen in kupfer-kupferoxydull-photozellen, *Phys. Zeit.*, 31 (1930) 913-925
- [9] J.T. Wallmark; “A new semiconductor photocell using lateral photoeffect “; *Proc. IRE*, 45 ; pag. 474-483; 1957
- [10] E. Fortunato, G. Lavareda, R. Martins, F. Soares, L. Fernandes; “Large-area 1D thin-film position-sensitive detector with high detection resolution”; *Sensors and Actuators A*51; pag. 135-142; 1996

- [11] Rodrigo Martins, Elvira Fortunato; “Static behaviour of thin-film position-sensitive detectors based on p-i-n a-Si:H devices”; Sensors and Actuators A51; pag. 143-151; 1996
- [12] UDT Sensors, Inc; guia técnico
- [13] H. Águas, L. Pereira, D. Costa, E. Fortunato, R. Martins; “Super linear position sensitive detectors using MIS structures”; Optical Materials 27 (2005) 1088–1092
- [14] “PSD (position sensitive detector)”; guia técnico; Hamamatsu; July 2003
- [15] E. Fortunato, R. Martins, Rev. Sci. Instrum., **67** (1996) 2702
- [16] E. Fortunato, G. Lavareda, R. Martins, F. Soares, L. Fernandes; “Large-area 1D thin-film position-sensitive detector with high detection resolution”; Sensors and Actuators A, **51** (1996) 135.
- [17] “*Low Level Measurements*, precision DC current, voltage and resistance measurements”; Keithley; 5th edition; 1998o
- [18] “Photodiode characteristics and applications”; UDT inc.; Revision 98.3
- [19] Jan G.Korvink, Andreas Greiner; “Semiconductors for Micro- and Nanotechnology – An Introduction for Engineers”; Wiley-VCH; 2002
- [20] S.M. Sze; “Physics of semicondutors devices”; John Wiley; 1981
- [21] R.C. Jaeger; “*Introduction to Microelectronic Fabrication*”; Volume 5, Addison-Wesley Publishing Company, E.U.A., 1993.
- [22] “Erosão Seca”, Guião do trabalho pratico da cadeira de Técnicas Laboratoriais Avançadas, Departamento de Ciências dos Materiais, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, 2004.
- [23] J.L. Vossen, W. Kern; “*Thin Film Processes*”; Academic Press, Inc., E.U.A., 1978.
- [24] Millman, Halkias; “Integrated Electronics, analog and digital circuits and systems”; McGrawHill; 1972